平成１３年度（補正予算）即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業

「ヘテロコア光ファイバセンサによる水位計、成分計の開発」

成果報告書

平成１５年　３　月

委託者　関　東　経　済　産　業　局
委託先　タマティーエルオー株式会社

目　次

第１章　研究開発の概要

１．１　研究開発の背景・研究目的および目標

Ａ　研究開発の背景

日本は四面を海に囲まれ豊富な水資源に恵まれているが、急峻な国土に来襲する台風、豪雨に起因する洪水、河川の氾濫、土石流、急傾斜地崩壊、都市の浸水、さらには地震による建築物の倒壊などの自然災害により毎年大規模な人的被害、経済的損失を被っておりその対策や復旧作業に膨大な国家予算が投入されている。加えて大都市部近郊に立地する各種コンビナート、工業地帯および海上輸送ルートなどから発生する爆発事故や環境汚染などの人為的災害がその被害を更に拡大している。これら国家レベルで発生する人的、経済的損失をいかに防止するかが 21 世紀の安心、安全を目指した日本の社会基盤整備に課せられた緊急かつ最大の課題である。

その課題解決にためには早期に危険の予知を行い危機管理システムにつなげるなど、適切な対応を取り、災害の未然防止あるいは被害を最小限にとどめることが望まれており、災害、汚染の危険性のあるエリアに広範囲に点在している関連物理量をモニタリングし、その変動傾向をリアルタイムに捕らえることのできる新しいモニタリング技術の研究開発が急務である。

Ｂ　研究開発の目的

光ファイバーは高速、大容量情報伝送媒体としてわれわれの日常生活の必須要素になりつつある。情報伝送の分野ではすでに日本列島を網羅する一般的な高速大容量情報通信幹線はもとより高速道路、鉄道、河川、下水道などの社会基盤に沿って主として防災を目的とした各種情報伝送に光ファイバの敷設が進められている。近い将来はその端末が各家庭にまで達することが計画されている。一方計測制御の分野でも、光伝送による耐ノイズ、防爆、省エネルギーの特徴を生かして、信号伝送路として使用されつつあり、全光計測制御システムの構想も出ている。初期は従来型の電気式センサの出力電気信号を光信号に変換して伝送する方式であったが、光ファイバそのものの光学的、機械的性質を利用してセンサを実現する光学要素技術によるセンサの研究開発が進むにつれて全光計測システムの開発も進められている。すでに一部の歪みセンサや温度センサが実用化されつつある。

今回の研究開発プロジェクトの目的は先端的な光ファイバ技術による水位計測センサと光ファイバ技術による化学成分センサを開発し、それらをネットワークで結ぶことにより国土の水循環ならびにコンビナート周辺の環境汚染を監視し総合的な防災システムを構築することにある。

しかし現用の歪み計測を応用した光ファイバ水位センサはその温度依存性による計測精度の低下、機械的強度（ファイバ破断）などの問題があり、それを対策するために複雑、

高価なシステムになっており実用的な技術としての確立がなされておらず普及が進んでいないのが現状である。また化学成分量の計測は更に遅れており、実用の目処は全くないといってもよい。米国、英国、フランスなどの海外では、光ファイバと表面プラズモン共鳴現象を組み合わせた化学センサを開発しているが、コア中の光信号にいかにして外界の化学的変化を伝えるかという点に課題があり、結果的に光ファイバの機械的強度を極度に脆弱化してしまい、実用的な方式となり得ていない。

本研究開発では技術シーズとして提案者の特許として確立されたヘテロコア構造光ファイバセンサを導入することが最大の特徴である。ヘテロコア構造光ファイバセンサは図 1.1.1 に示すようにコア径の異なる光ファイバを部分的に融着挿入しただけの単純な構造でありながら、極めて高感度であり、図 1.1.2 に示すように機械的なひずみと光学的な屈折率の両者を計測できる多様性により先に述べた既存技術の問題点を克服できる能力を有している。さらに一般の光ファイバセンサと同様に光情報伝送システムで故障点検知用に開発された OTDR システムを信号検出手法として用いることによって光ファイバ網上の多数の観測点からの多点情報を一括して広範囲にわたって遠隔監視するシステムを構成することが可能である。

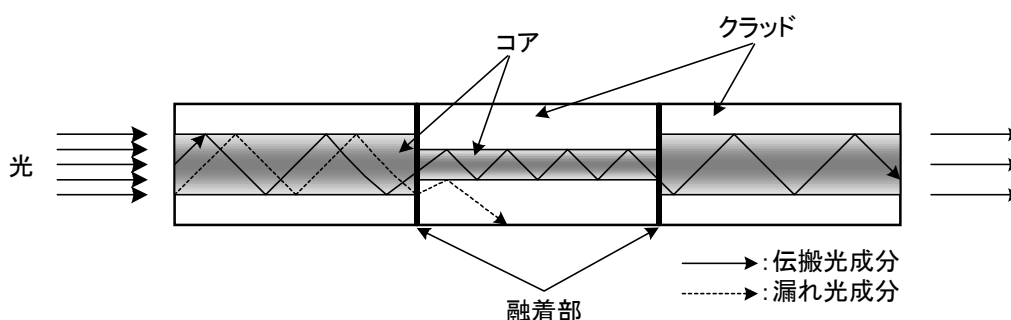



図 1.1.1　ヘテロコアファイバの構造

機械的物理量計測

物理的な曲がりが加わると
光の洩れ量が変化する

成分計測

クラッド外周の物質が変わると
光の屈折が変化する

図 1.1.2　ヘテロコアファイバのセンサへの応用

C　研究開発の目標

1）従来の光ファイバセンサに比べ二桁以上高感度計測を実現するヘテロコア光ファイバセンサの製作技術を確立する。これにより多数のセンサの量産化、標準化、高信頼性が達成される。

2）試作したヘテロコア光ファイバセンサを利用して歪み計、屈折率計の構成について研究し試作、性能評価を行う。

3）歪み計、屈折率計として実用化できるひずみ計モジュール、屈折率計モジュールの試作完了後、これを応用した水位計、成分計システムの基本設計を行う。

4）開発するシステムは取り扱いが簡単で高速モニタリングが可能、低価格で市場に出せるものを目標にする。既存技術の置き換え市場もターゲットにいれた開発とする。

5）試験システムとして複数のセンサモジュールをネットワーク配置した構成を試作評価する。試作システムの構成は以下とする。

（1）センサーモジュールを含む光ファイバネットワーク

（2）光ファイバスイッチ

（3）OTDR

（4）システムコンソール

このうち光ファイバスイッチ、OTDR は既存の技術を転用し本開発の対象にしない。

6）研究開発目標の仕様はは下記の通りである。

（1）測定対象：河川等の水位（ヘテロコアの曲げ損失依存性の応用）
　　　　　　　化学物質屈折率（ヘテロコアの外界相互作用機能の応用）

（2）測定範囲：
　　　　　　　河川水位 最大水位 10m、 測定精度 ±10mm
　　　　　　　低屈折率領域 1.00～1.30
　　　　　　　高屈折率領域 1.30～1.60

（3）標準測定点数：10～20／システム

（4）ネットワーク長： 1km 以内

（5）計測所用時間：20 秒／1 測定点

図 1.1.3 にプロジェクトの目指す事業化構想を示す。

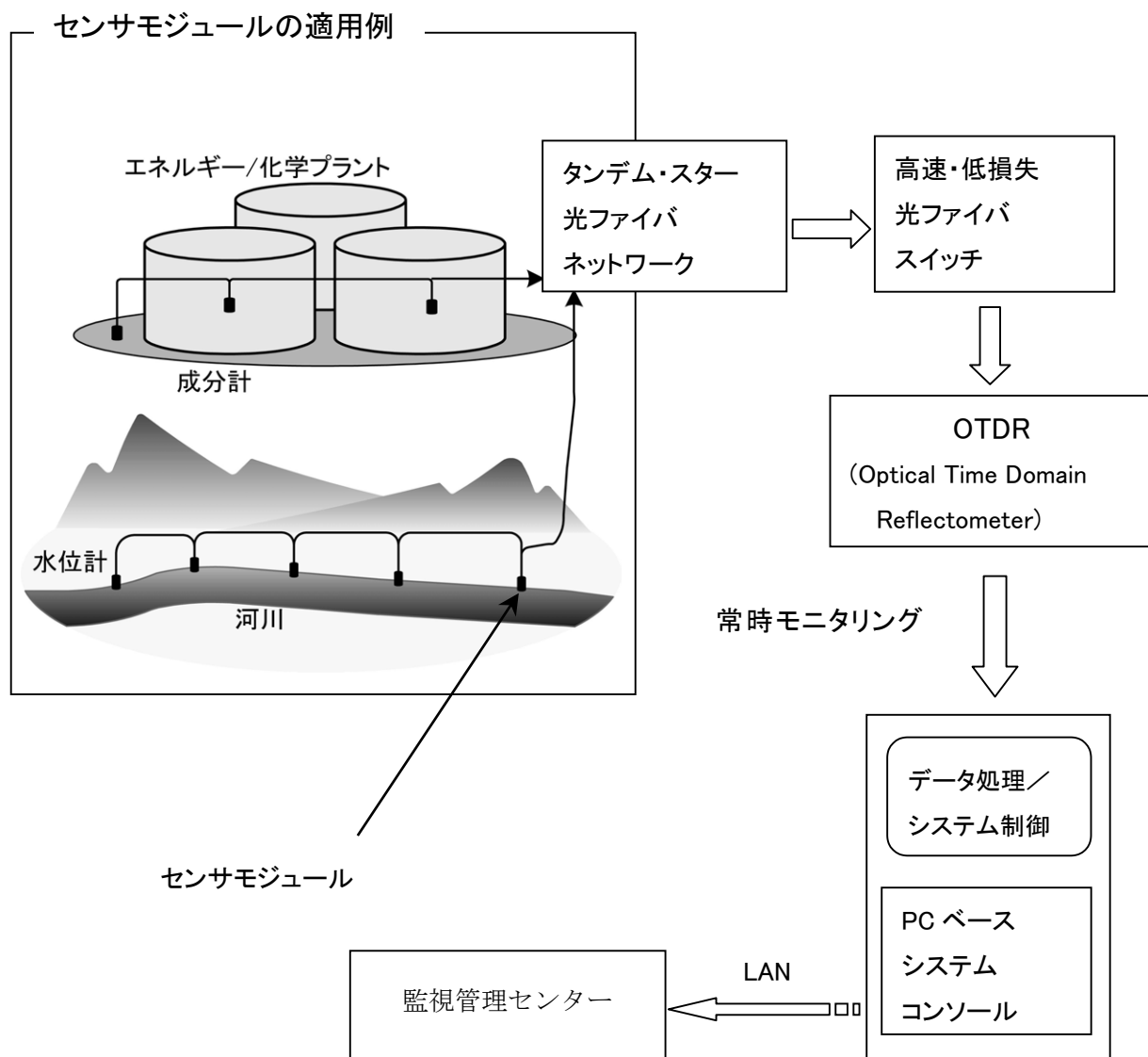



図 1.1.3　プロジェクトの目指す事業化構想

１．２　成果概要

Ａ　成果概要

本研究は、タマティーエルオー株式会社を管理法人とし、創価大学工学部、横河電子機器株式会社、株式会社インターアクションにおいて、平成 14 年 3 月 26 日から平成 15 年 3 月 31 日の期間で実施された。ヘテロコア構造の光ファイバセンサを応用して、河川・ダム等の水位計測用の水位計及び液漏れ検知も可能な液体の屈折率計を開発した。

機器導入をはじめとする開発環境の準備、また創価大学工学部から上記 2 企業への技術移転作業に 4 ヶ月ほど費やした。技術移転は、ヘテロ・コア素子の動作原理、製作技術、計測機構、取り扱い、性質などの多岐に渡るもので、光ファイバ切断機、融着機、洗浄機、リコータなどの必要機器の導入後、創価大学工学部渡辺一弘研究室によって行われた。

横河電子機器（株）は水位計を、（株）インターアクションは成分計としての屈折率計の開発を行い､各々製品化が可能なプロトタイプの開発に成功し､研究目的をほぼ達成した。

創価大学工学部は両社の開発に必要な種々の情報提供を絶え間無く行いながら、以下の様な成果を納めた。まず、9-5-9 型（コア径 9 μm の伝送路ファイバに 5 μm のヘテロコア部を組み合わせ）で、挿入長を 5mm から 1mm まで変化させてセンサ素子の挿入損失、曲げ／損失特性を綿密に計測した。挿入長 1～2mm において挿入損失 0.5db 程度となり、センサに適した損失変化特性となることが明らかとなった。直線的変位を曲げに変換する機構について、変換機構構造、光ファイバの固定、最大変位の観点から検討を加え、最大変位 5mm とした場合フルスケール誤差として 1%以下を達成した。さらに、変換機構自体の熱移動等を考慮した場合 0.1%のフルスケール誤差に納めることも可能となった。一連の実験は、ヘテロ・コア構造のセンサ素子が微細な形状変化に対し鋭敏に反応し、センサとしての感受性が極めて高いことが実証された。ヘテロ･コア部のリコートに関しても、UV 硬化樹脂、シリコン系ゴム、金コートなど各種試験を行い、再現性、耐腐食性の観点から金コートが比較的適していることも明らかとなった。これらの詳細な実験結果は、横河電子機器（株）に提供され、水位計の精度 0.1%を達成するための重要なバックアップデータとなった。

上記と並行して、50-3-50 型ファイバ素子を用いた成分計としての素子製作条件を求める研究が行われた。そのために導入した高周波スパッタ装置はそのカギをにぎる重要な働きをした。屈折率を測定する原理として表面プラズモン共鳴現象を採用するため、ファイバ素子表面に均一な金属コートを行う必要性が生じ、そのために回転機構を備えた特別な治具が開発さた。これにより、同じに均一コーティングのセンサ素子が最大 8 個まで同じに製造され、開発のスピードを格段に速め研究を短時間に成功に導いた。屈折率測定のための最適な挿入長、固定機構、金属コーティング条件について、詳細な実験的検討を加え、（株）インターアクションに設計指針を与えた。屈折率計開発のためのセンサ素子を（株）インターアクションに供給し、プロトタイプ開発を成功させた。

開発した2つの種類のセンサは、既存の従来の光ファイバセンサ技術に比べ、1）センサ素子自体の温度依存性がない、2）構造が簡便で、製造し易い、3）システム全体のコストが圧倒的に低い等の実用的な優位性を有している。光計測手法は、LED／PDとOTDRの両方を利用できる。

横河電子機器（株）が開発した水位計は極めてシンプルな機構で有りながらフルスケール誤差で0.1%の精度が達成された。また、水位計は1つの光ファイバラインに複数タンデムに接続できるため、OTDRを用いた光ネットワーク網をフルに活用できる大きな利点を有している。

（株）インターアクションの開発した屈折率計は、従来技術における被測定資料のサンプリングを必要とせず、"その場"計測が可能で、液体内の屈折率分布の計測を初めて可能にした。最小屈折率分解能は0.0003が達成された、市販のハンディタイプの精度を上回った。屈折率計としての応用のみならず水・油・酸などの単純な漏洩をリアルタイムで計測できる。

B　Overview of Research Results

This research project has been carried out by the consortium which consists of the faculty of engineering of SOKA university, Yokogawa denshikiki Co.,Ltd., and Inter Action Co. under the management corporation, TAMA-TLO Inc., and has been fully funded by the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, for the period of Mar.26, 2002 – Mar.31, 2003. The project group has developed a water level gauge for the sake of monitoring water level at rivers and dams, and a refractive index meter which has an additional function of water- or oil- leakage detection, using a novel, newly developed fiber sensing technology named "hetero-core structure".

The project spent 4 months at the beginning in setting up various experimental environments and in the course of technology transfer from the university to the other two companies mentioned above. The transfer of technology was started under the supervise by Prof. K.Watanabe's laboratory at the faculty of engineering of SOKA university soon after getting ready for the usage of a fiber cleaver, optical fiber splice machines, cleaners, re-coating machines and any other measurement instruments, with covering the many detailed aspects such as the operational principle and fabrication technique, general sensing properties, measurement tips and handling manner of hetero-core optical fiber sensing elements.

Yokogawa denshikiki Co., Ltd. and Inter Action Co. have succeeded in developing the prototypes of a water leveling gauge and a refractive index meter, respectively, with the significant fulfillment of their project targets, both of which could be commercially available in a few more year after brushing-up their reliability as the final products.

The university group has continually provided the two companies with essential information and data necessary for the developments and has complete the mission with the following fruitful results. Precise measurements were performed on the bending/loss property with changing the insertion length of hetero-core element in the range from 5 to 1mm for the case of the 9-5-9 types (combination of 5-um hetero-core and 9-um transmission optic fiber line). An insertion length of 1-2 mm with an insertion loss of 0.5 db was found to be preferable to realize a suitable bending/loss property for the purpose of the sensors to be developed. Careful designing was attempt on a linear displacement/bending conversion mechanism, the mounting structure of optical fiber element, and the maximum coverage displacement range, so that a full-scale error of less than 1% has been achieved for the full scale coverage range of 5mm. This precision was surprisingly improve to be 0.1% by experiments considering heat transfer on the used displacement/bending conversion mechanism. A series of experiment verified that the hetero-core structured sensing element was keenly sensitive to given precise change in its shape, meaning an extremely high susceptibility as sensor elements. Various try-and- error based attempts were made on re-coating materials around hetero-core portion for damage protection using UV resin, silicone rubber, and gold metal thin film. The use of gold thin film coating was comparatively promising from the viewpoints of the reproducibility of the sensor property and the corrosion proof. These detailed experimental results are timely provided for Yokogawa group as back-up data to help them achieve a precision of 0.1% for the water leveling gauge to be developed.

In parallel with the above tasks, there were an another group in the lab. which were in charge of finding a good thin-metal-film coating condition suitable for surface plasmon resonance (SPR) phenomenon to develop refractive index measurement using 50-3-50 types of hetero-cores. A newly introduced RF sputtering machine has played a very important role. Since the principle of refractive index measurement employs the SPR phenomenon which takes place in the boundary layer between outer cladding surface and metal thin film, uniform metal coating had be made around the fiber cylindrical surface. For that purpose, a specially arranged rotating mechanism was devised which enabled 8 pieces of optic fiber samples at maximum to be uniformly coated, and remarkably speeded the investigation, consequently lead the whole research targets to be achieved in short time. The experiment using SPR importantly yielded the optimum coating conditions and insertion length, the design concept of fiber mounting and the related information which were all provided for the refractive index meter designing made by Inter Action Co. Sizable coated sample needed by Inter

Action Co. were timely dispatched to them from the university laboratory. This action by the university was greatly helpful for the prototype module to be succeeded.

The two type of sensors developed in this research project have been advantageous over the conventional optic fiber sensor schemes from the attractive viewpoints of 1)no need of temperature compensation to sensor elements, 2)simple structure and easy fabrication, and 3) cost-effective system integration, with the capable uses of both LED/PD combinations or OTDR as optical measurement schemes.

The water level gauge developed by Yokogawa group has achieved a 0.1% of precision in a simple structure, with an additional merit of OTDR based optical networks system because of the capable tandem arrangement in a single fiber line.

On the other hand, the refractive index meter developed by Inter Action group has enabled in-situ sampling, which has been long impossible using conventional methods, for the first time. With this invention, distribution of refractive index in a liquid tank will be realized. The performance of the meter has exceeded conventional, commercially available handy types in a minimum resolution of 0.00003 refractive index. This technology could put forth the ability not only in the refractive index monitoring but also in real-time based leakage detection of such liquids as water, oil, acid and others.

１．３　事業化に向けた取組み（今後の展望）

Ａ　水位計開発（ひずみセンサモジュール開発）

（１）製品化の見通し

第３章に詳述するようにヘテロコア光ファイバを応用した光ファイバ水位変換モジュールを試作開発した。製品化にあたってはさらに次のような課題解決に取り組んでいく必要がある。

①　センサモジュールの量産技術の確立

今回の研究開発で得られた成果をベースにして求められる多様な動作環境（周囲温度、振動、耐食性など）においても安定した製品性能、品質を発揮できる製品設計技術を確立し、市場価格に対応できるセンサーモジュールの量産技術を確立する必要がある。

②　専用変換器の開発

本研究プロジェクトでは汎用の OTDR を計測手段として使用したが、多点の高精度水位計測には現状機能では不十分な点があり更なる計測法の開発が必要である。そしてこれらの機能や専用処理ソフトを組み込んだコストパフォーマンスの良い専用変換器の開発が必要である。

③　フィールドテストによる実績評価

防災システムでは誤報による信頼性の低下防止のため新しい機器の採用にあたっては実績重視主義がとられる。したがって河川や上下水道などでの１年程度の連続計測による性能確認を実施し、並行して関係官庁への認知活動を行う必要がある。

（２）事業化計画

本研究では河川管理・防災を主眼とした河川・ダムの水位計測への適用を念頭におきセンサーモジュールの開発概念を構築し、市場の要求精度である 0.1%の高精度水位計の開発を目標とした。すでに主要な河川には光ファイバの敷設が開始されており、従来の電気式水位計に変わり光ファイバネットワークを使った新しい水位計の実用化が期待されている。横河電子機器ではこれらの市場に向けて既に従来の電気式水位計の開発、製造、販売、施工、保守の事業を展開しており、ヘテロコア光ファイバ水位計の製品化により新規計測設備への投入、既設設備のリプレイスなどを当面のターゲット市場として水位計測事業を拡大してく。

水位の計測は地球の水循環、水収支を管理し、各種変動を予知するための基本計測量であり河川・ダム以外にも上下水道、地下水調査、集排水、プラント工業計測などあらゆる分野に広く用いられている。ここでも光ファイバ水位計の持つ特長が発揮される分野は多いと考えられるが、測定精度をはじめとする機能や価格も多様化すると思われ、事業化にあたっては市場にマッチした製品の投入が必要となる。今後も積極的なマーケティング活動を推進することにより光ファイバ水位計をキープロダクトとして更なる市場拡大を図っていきたい。

Ｂ　成分計開発（屈折率センサモジュール開発）

（１）製品化の見通し

①　屈折率計モジュールの量産技術の確立

センシングの液体によって、多くのデータ取りを含めた開発作業が必要であり、対象の液体毎にセンサの量産技術を確立して行く。

設置される場所の雰囲気が油、酸、食品等の製造プラント内になるため、耐油、耐酸、安全性を配慮した開発が必要となる。

②　専用計測システムの開発

研究開発プロジェクトでは、計測手段として OTDR を使用するが、多点計測システムとして製品化するには OTDR 機能を組み込んだ専用計測器開発、センサネットワーク化開発及びモニタリング用のソフトパッケージの開発、製品化を行う。

（２）事業化計画

①　事業化は、インターアクションが中心に取り進めるが、株式会社アタゴ等が協力会社として行う。通常の化学分析システムと同様に、（市場調査と獲得目標市場の決定→開発製品の仕様決定→製品設計→製造→販売・保守）の手順を辿ることとなる。株式会社アタゴは、昭和 15 年創業の会社で屈折率計の開発、製造、販売の専門会社である。同社には、屈折率計の製造・販売に関する協力を要請する。業界での太い販売チャネルを有しており、この面での不安要素はない。

②　今回対象とした市場以外にも、未だ応用可能な大きな市場が残されていると考えられるので、アドバイザー（所属：東京大学、防衛大学校、独立行政法人港湾空港技術研究所、横河総合研究所）の助言を得て進めて行きたい。

③　将来、事業化が進み、本技術が広く知れ渡るに伴い、新たなニーズも顕在化することが考えられる。顧客のニーズを満たしていくなかで、新たな分野への適用、新しい製品の開発が期待される。これらの展開については、タマティーエルオーが中核的な役割を担って、特許、ノウハウ等を積極的に地域企業に公開しその活性化につなげていく。

Ｃ　光ファイバ総合計測ネットワークの構想

光ファイバーネットワーク計測の更なるメリットは光ファイバ上に水位や成分にとどまらず歪、振動など各種のセンサ、また今後開発が期待される新たなセンサを配して総合的な光計測システムが構成できることである。今回のコンソーシアム研究開発事業を通じて実現された TLO、大学、企業の連携活動を発展、拡大させて光ファイバ総合計測ネットワーク構想の実現につなげて行きたい。

１．４　研究体制

Ａ　研究組織及び管理体制

（１）研究組織

本プロジェクトの研究組織を図 1.4.1 に示す。委託先である管理法人タマティーエルオー（株）から創価大学、横河電子機器（株）、（株）インターアクションの 3 機関（私立大学 1、民間企業 2）が再委託を受け研究に参加した。

総括研究代表者として大学側から創価大学工学部　情報システム学科長　教授　渡辺一弘、副総括研究代表者として民間企業側から横河電子機器（株）常務取締役　技術開発本部長　山本　眞人を選任し研究開発を推進した。

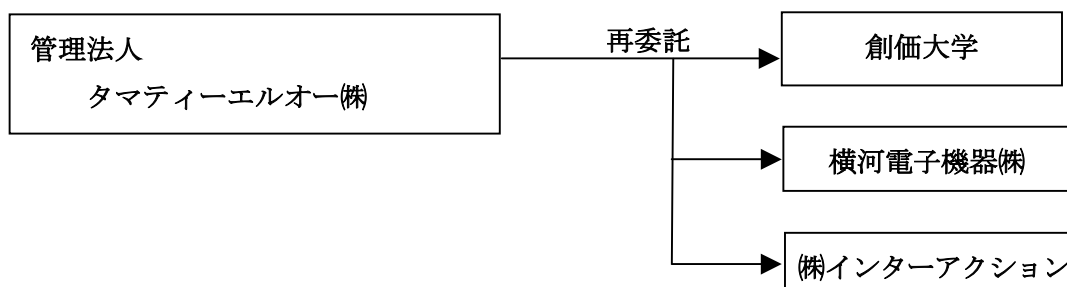



図1.4.1　研究組織

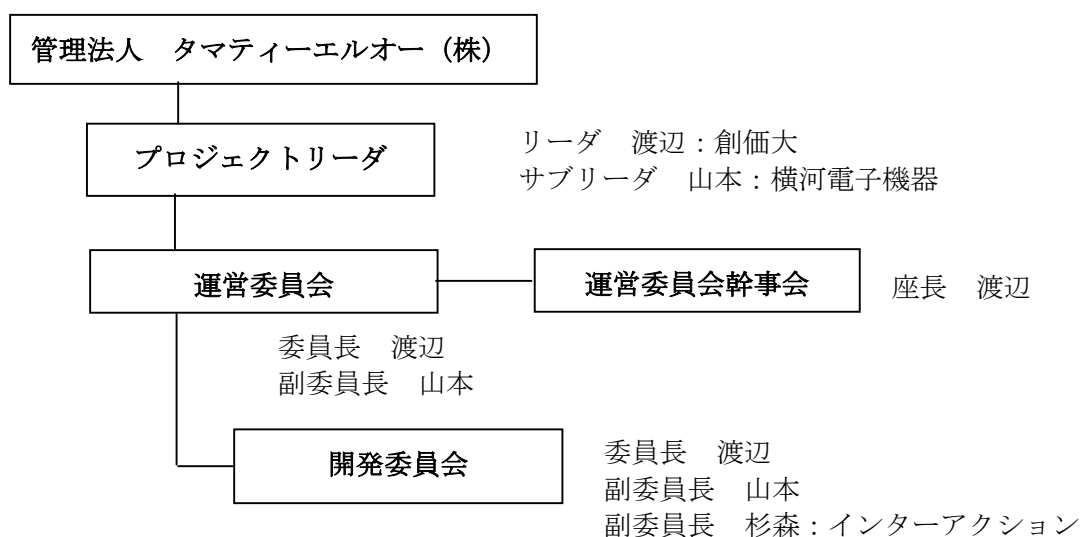



図1.4.2　プロジェクト管理体制

（2）管理体制

短期間の研究開発事業であるためプロジェクト管理体制としてはプロジェクトリーダーのもと研究管理に必要な各種委員会を設けて、プロジェクトの円滑かつ効率的な運用を行った。

図 1.4.2 にプロジェクトの管理体制を、表 1.4.1～表 1.4.3 に各委員会の構成メンバーを示す。

① 運営委員会

本プロジェクト全般の企画、組織、運営、進捗管理、予算管理、対外活動などを審議、決定する。

② 運営委員会幹事会

運営委員会の活動を円滑に進めるために、運営委員会の中に幹事会をおき、運営委員会の意向を受けて、プロジェクト全般の円滑な推進のために活動を行う。

③ 開発委員会

本プロジェクトの研究開発活動の実質的な推進機関として主として技術面における具体的な企画、遂行、管理、調整などを月 1 回程度の開催で行う。

表1.4.1　運営委員会

	氏　名	所属及び役職
委員長	渡辺　一弘	創価大学　工学部情報システム学科長　教授
副委員長	山本　眞人	横河電子機器株式会社　常務取締役　技術開発本部長
委員	桑原　義男	株式会社インターアクション　専務取締役
委員	井深　丹	タマティーエルオー株式会社　代表取締役社長
委員	石川　宏俊	タマティーエルオー株式会社　産学官連携事業部
アドバイザ	保立　和夫	東京大学　大学院工学系研究科電子工学専攻　教授
アドバイザ	高橋　信明	防衛大学校　通信工学科　教授
アドバイザ	濱田　秀則	（独）港湾空港技術研究所　材料研究室　室長
アドバイザ	大手　明	株式会社横河総合研究所　主席研究理事

表1.4.2　運営委員会幹事会

	氏　名	所属及び役職
座長	渡辺　一弘	創価大学　工学部情報システム学科長　教授
委員	山本　眞人	横河電子機器株式会社　常務取締役　技術開発本部長
委員	桑原　義男	株式会社インターアクション　専務取締役
委員	井深　丹	タマティーエルオー株式会社　代表取締役社長
委員	石川　宏俊	タマティーエルオー株式会社　産学官連携事業部

表1.4.3　開発委員会

	氏　名	所属及び役職
委員長	渡辺　一弘	創価大学　工学部情報システム学科長　教授
副委員長	山本　眞人	横河電子機器株式会社　常務取締役　技術開発本部長
副委員長	杉森　忠之	株式会社インターアクション　取締役開発本部長
委員	関　篤志	創価大学　工学部生物工学科　助教授
委員	上野　光司	横河電子機器株式会社　盛岡技術部・主任
委員	浅宮　政則	横河電子機器株式会社　技術開発本部・係長
委員	桑原　義男	株式会社インターアクション　専務取締役
委員	高橋　功	株式会社インターアクション　開発本部開発部開発課
委員	井深　丹	タマティーエルオー株式会社　代表取締役社長
委員	石川　宏俊	タマティーエルオー株式会社　産学官連携事業部

なお、佐々木　博幸、伊賀　光博、中澤　毅（いずれも、創価大学工学部情報システム学科渡辺研究室）の３名には開発委員会に常時オブザーバとして出席し、研究成果を披露し、積極的に討論に参加していただいた。

（３）研究者氏名

本プロジェクトの研究に従事した研究者名と主たる研究項目を研究機関ごとに示す。

１）管理法人

①　タマティーエルオー㈱

氏　名	所 属 及 び 役 職	研　究　項　目
井深　丹 石川　宏俊	代表取締役社長 産学官連携事業部	総合調査研究

２）再委託先

創価大学

氏　名	所　属・役　職	研　究　項　目
渡辺　一弘 関　篤志 久保田　譲	工学部情報システム学科長　教授 工学部生物工学科　助教授 工学部情報システム学科　教授	ヘテロコア構造センサ部開発

横河電子機器株式会社

氏　名	所　属・役　職	研　究　項　目
山本　眞人 上野　光司 浅宮　政則 宮地　潤平	常務取締役　技術開発本部長 盛岡技術部・主任 技術開発本部・係長 技術開発本部・課長	ヘテロコア構造センサ部開発、 歪センサモジュールの試作開発

株式会社インターアクション

氏　名	所　属・役　職	研　究　項　目
桑原　義男 杉森　忠之 西沢　光明 玉井　進悟 中山　俊幸 高橋　功	専務取締役 取締役開発本部長 取締役技術・製造本部長 開発本部開発部開発課・課長 開発本部開発部開発課・係長 開発本部開発部開発課	ヘテロコア構造センサ部開発、 屈折率センサモジュールの試作開発

（4）協力者

本プロジェクトに関する協力者として表 1.4.4 に示す方々に技術的なアドバイスをいただいた。

表1.4.4　協力者と指導事項

氏　名	指導・協力事項
保立　和夫 東京大学　大学院工学系研究科 電子工学専攻　教授	光ファイバセンサ及び光情報処理技術全般
高橋　信明 防衛大学校　通信工学科　教授	光ファイバセンサ及び応用光学全般
濱田　秀則 ㈱港湾空港技術研究所　材料研究室　室長	コンクリート等構造物劣化検出及び防止技術
大手　明 株式会社横河総合研究所　主席研究理事	光ファイバセンサ技術

１．５　研究実施場所一覧表

表 1.5.1　研究実施場所一覧

研究機関	実施場所
タマティーエルオー（株）	〒192-0083　東京都八王子市旭町 9 番 1 号 八王子スクエアビル 11 階
創価大学　工学部	〒192-0083　東京都八王子市丹木町 1-236
横河電子機器（株）	〒180-8750　東京都武蔵野市中町2-9-32　本社 〒257-8502　神奈川県秦野市曾屋 500　秦野事業所
（株）インターアクション	〒236-0004　神奈川県横浜市金沢区福浦 1-1

１．６　工業所有権の取得状況

プロジェクトの期間中を通じての研究開発の成果により 3 件の工業所有権の出願を準備中である。

なお、本プロジェクトを開始するにあたって拠り所となる取得済みおよび出願中工業所有権は以下のとおりである。

(1) ヘテロコア構造：特願平 8-162179　(株インターアクション、渡辺一弘)
伝送路光ファイバのコア径と異なるコア径の微小長光ファイバを伝送路中に融着挿入した構造をセンサとして機能させるという発明である。本研究開発の中心的な技術シーズで、原理特許である。平成 13 年 4 月特許査定（特許第 3180959 号）された。

(2) ヘテロコアの国際特許：PCT/JP97/01766（株インターアクション、渡辺一弘）
上記特許の PCT 特許で現在米国に出願し、審査請求中。

(3) 化学センサ：特願 2001-114597（TAMA-TLO）
特許(1)を利用して、ヘテロコア部の表面に高屈折率物質をコーティングし化学センサとしての性能を向上させ、多様な化学物質に対する検知を可能にする発明である。

(4) SPR センサ：特願 2001-159618（TAMA-TLO）
特許(1)を利用して、ヘテロコア部の表面に金、銀等の薄膜金属をコーティングしてクラッド層の伝播光により金属表面に表面プラズモン共鳴（SPR）現象を生じさせるという発明である。本研究開発では、屈折率計測の基本原理とする。

(5) 歪センサシステム：特願 2002-13249（TAMA-TLO）
特許(1)を利用してヘテロコアセンサの長手方向に直交する応力で屈曲、復元させる機構手段をもった光ファイバ歪センサとその計測システム。

１．７　対外発表の状況

本プロジェクトの期間中に以下に示す対外発表、展示などを行った。

1) 屈折率計ではなく、伸縮計ではあるが、経済産業省が主催したベンチャープラザに出展した。（平成 14 年 11 月 12,13 日、東京交通会館）　ヘテロコア光ファイバセンサの特徴等を展示するとともに、プレゼンテーションを実施し、多数の来場者に P.R.を行った。
2) 伊賀光博、中澤毅、関篤志、渡辺一弘
「銀薄膜による SPR ヘテロコア型光ファイバ屈折率センサ」
計測自動制御学会産業応用部門 2002 年度産業応用部門大会 2002 年 11 月、東京工業大学（東京）、講演論文集 pp56-60,2002.
3) 佐々木博幸、忍田信彦、久保田譲、渡辺一弘
「ヘテロコア型光ファイバセンサの伸縮センサへの応用」
計測自動制御学会産業応用部門 2002 年度産業応用部門大会 2002 年 11 月、東京工業大学（東京）、講演論文集 pp51-56,2002
4) 近藤雅子、伊賀光博、中澤毅、関篤志、久保田譲、渡辺一弘
「光ファイバの表面プラズモン共鳴現象における膜厚の効果」
第 63 回応用物理学会学術講演会、平 14 年 9 月、新潟大学（新潟）、同上学会予稿集　26a-ZH-23, p.1061.
5) 伊賀光博、中澤毅、関篤志、久保田譲、渡辺一弘
「ヘテロコア光ファイバセンサにおける表面プラズモン共鳴の理論的検討」
第 63 回応用物理学会学術講演会、平 14 年 9 月、新潟大学（新潟）、同上学会予稿集　26a-ZH-24, p.1061.
6) 中澤毅、伊賀光博、関篤志、久保田譲、渡辺一弘
「表面プラズモン共鳴（SPR）光ファイバセンサによる屈折率計測」
第 63 回応用物理学会学術講演会、平 14 年 9 月、新潟大学（新潟）、同上学会予稿集　26a-ZH-25, p.1061.
7) 忍田伸彦、佐々木博幸、石田充、渡辺一弘、久保田譲
「ヘテロコア型光ファイバセンサのヘテロコア挿入長と伝送損失の検討」
第 63 回応用物理学会学術講演会、平 14 年 9 月、新潟大学（新潟）、同上学会予稿集　26a-ZH-27, p.1062.
8) 佐々木博幸、忍田伸彦、石田充、渡辺一弘、久保田譲
「ヘテロコア型光ファイバセンサの曲率・変位変換機構の検討」
第 63 回応用物理学会学術講演会、平 14 年 9 月、新潟大学（新潟）、同上学会予稿集　26a-ZH-28, p.1062.

9) A.Seki, M.Iga, K.Hirama, T.Nakazawa, and K.Watanabe,
"Application of hetero-core fiber optic to chemical and biological sensing",
The Seventh World Congress on Biosensors, 15-17 May, 2002(Kyoto,Japan), Abstract book P1-2.05.
10) M.Iga, K.Hirama, T.Nakazawa, A.Seki, K.Watanabe, and Y.Kubota,
"Hetero-Core structured fiber-optic sensor based on surface plasmon resonance",
International Conference on Application of Photonic Technology:ICAPT 2002(Photonic North), 2-6 June, 2002(Quebec, Canada), M-A2-FO-2.
11) 関篤志、伊賀光博、平間恭子、中澤　毅、田辺弘幸、渡辺一弘、
「ヘテロコア型光ファイバを用いる屈折率の測定」
2002年電気化学会第69回大会、平成14年4月、東北大学（仙台）、Proceedings of the 34th chemical sensor symposium ; Chemical Sensors, Vol.18,supplement A(2002) p.76-78.
12) 地域発先端テクノフェア2003出展 2003年3月12日～13日　東京国際フォーラム展示会場

１．８　当該プロジェクト連絡窓口

表1.8.1　プロジェクト連絡窓口

機関および連絡窓口	連絡先
タマティーエルオー（株） 代表取締役社長　井深　丹 産学官連携事業部　石川宏俊	〒192-0083　東京都八王子市旭町9番1号 八王子スクエアビル11階 Tel：0426-31-1325
創価大学工学部情報システム学科 教授　渡辺　一弘	〒192-0083　東京都八王子市丹木町1-236 Tel：0426-91-9421
横河電子機器（株） 常務取締役技術開発本部長　山本　眞人	〒257-8502　神奈川県秦野市曾屋500　秦野事業所 Tel：0463-81-1400
（株）インターアクション 専務取締役　桑原　義男	〒236-0004　神奈川県横浜市金沢区福浦1-1 Tel：045-788-8373

第２章　ヘテロコア構造センサ部開発

２．１　はじめに

ヘテロコア構造センサは大きく 2 種類に分類できる。1 つは、伸張・圧縮・歪み・水位等を計測する物理検知センサであり、もう一方は、屈折率・pH 値・酸濃度等の環境検知センサである。

２．２　物理検知センサ

最初に、物理検知センサについて説明する。物理検知センサのヘテロコア構造センサは、コア径 9 μm の光伝送用シングルモードファイバに、9 μm よりも若干小さなコア径のファイバの小切片を挿入、融着したものである。その挿入、融着した部分がセンサ部であり、ヘテロコア部と呼ぶ。この物理検知センサは、9 μm のシングルモード伝送光がヘテロコア部の境界面で一部の光がクラッド層にリークする。また、ヘテロコア部のコアにおいて部分的にシングルモード伝播を行うが、一部はクラッドへリークしやすくなる。これらのリークの度合いはヘテロコア部の曲げという変形の大きさに強く影響され、OTDR（Optical Time Domain Reflectometer）上では損失変化として計測できる。OTDR は、後方散乱光法によりファイバの伝送損失を測定する計測器である。OTDR は光ファイバシステムの全損失、区間損失、ファイバの長さ等を測定することができるため、物理検知センサタイプのヘテロコア構造センサをタンデムに繋げ測定が可能である。このタンデム接続という特徴は、センサシステムとしてのコストに大きく係わってくるものである。尚、伝送路に 9 μm のファイバを使い、ヘテロコア部に 5 μm を使用したヘテロコア構造センサを、9－5－9 型ヘテロコアセンサと呼ぶ。

２．３　融着手法

ヘテロコア型光ファイバは、伝送路である光ファイバの任意の位置を切断し、その部分に伝送路よりコア径の小さい光ファイバを挿入、融着することで成り立っている（図 2.3.1）。以下、ヘテロコア型光ファイバの作製方法について説明する。

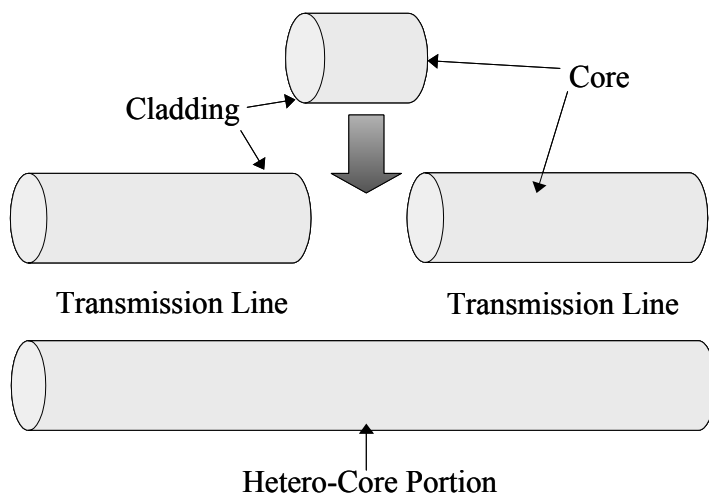



図 2.3.1　ヘテロコア型光ファイバの構造

まず、伝送路用光ファイバを

任意の位置で切断する。通常の光ファイバは、クラッド層の外側は被服で覆われているため（図 2.3.2）、切断面付近とヘテロコア部に用いるファイバの被服部分をホットストリッパーで除去し、その後、被服除去部分のほこりなどの付着物をアルコールで拭き取る。

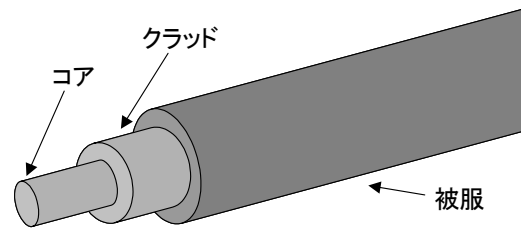



図 2.3.2　光ファイバの構造

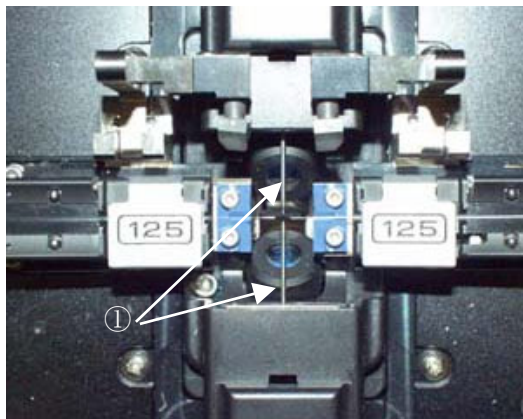
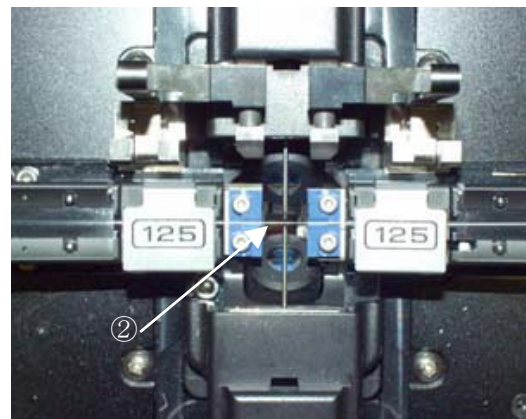
次に、ファイバカッターで端面を垂直に切断する。その際、光ファイバの端面角が垂直になっていないと、融着に失敗する、あるいは接続損失が大きくなるなどの問題が生じるため、端面角は 1.0°以下となるようにする。そして、融着器でコア径の異なる 2 本のファイバを融着する（図 2.3.3）。設置台が両側から近づき、放電により先端を溶かしながら押し込むことによりファイバが融着される。このときの放電パワー、放電時間は、試行を繰り返して得た最適値である、20bit、2000msec としている。この手順で片側を融着した後、必要なヘテロコア部の長さに合わせてもう一方を同様の手順で切断､融着することでヘテロコア型光ファイバを作製することができる。

a）　融着前

b）　融着後

図 2.3.3　光ファイバの融着（①電極棒、②光ファイバ）

２．４　物理検知センサ

Ａ　曲げ変換機構

物理検知センサのヘテロコア構造センサは､ヘテロコア部に曲げを与えることによって、ヘテロコア部における損失量が変化する。すなわち、変位量をヘテロコア部の曲げ量に変換する機構があれば様々なセンサと組み合わせることによって、光ファイバを利用することのできなかったセンサでも､光ファイバセンサとすることができる (図 2.4.1)。そこで、ヘテロコア構造センサの曲率を変位量に変換する機構を提案する。

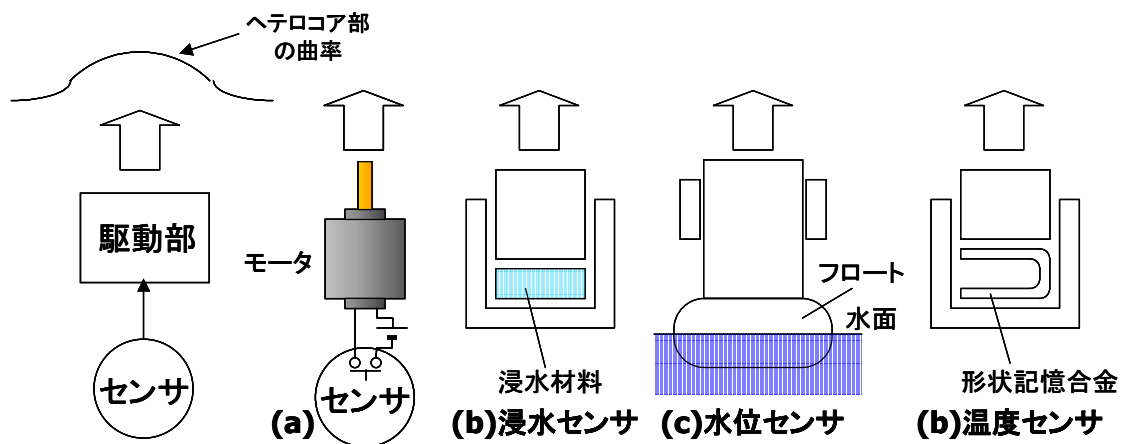



図 2.4.1　物理検知センサと他のセンサの結合

図2.4.2に､曲げ変換機構の概観を示す。ヘテロコア部を含むファイバの 2 ヶ所を固定し､その 2 ヶ所を近づけることによって、ヘテロコア部に曲率が発生する。実際には、2 つのファイバ・クランパを設置し、ヘテロコア部がクランパ間のちょうど中央に位置するように、ファイバをクランプする。そして、クランパ間の間隔が縮まることによって、ヘテロコア部に曲率が発生する仕組みである。9－5－9 型ヘテロコアセンサにおけるクランパ間の初期間隔は 35mm とし､そこからクランパ間隔は 30mm まで近づくように設置している。9－5－9 型ヘテロコアセンサでは、この条件下で最大損失が数 dB 程度であって、破断はしない。

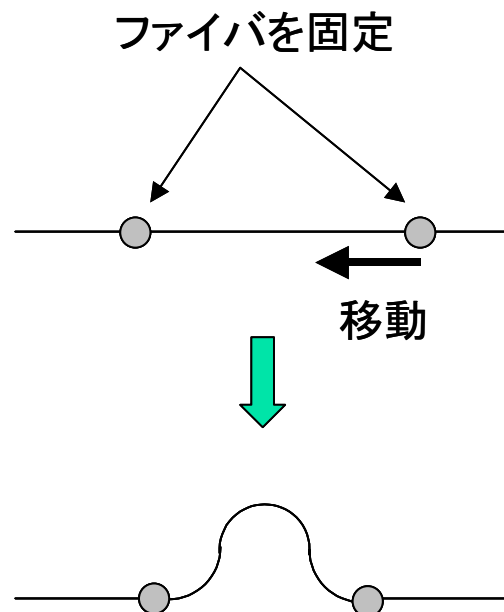



図 2.4.2　曲げ変換機構概念図

B　実験装置

実験装置の概観を図 2.4.3 に示す。また、実験装置を図 2.4.4 に示す。台座の上に固定台と移動ステージを固定し､それぞれの台の上にファイバ･クランパをネジにより固定する。そして、ヘテロコア部がクランパ間のちょうど中央に位置するように、ファイバをクランプする。移動ステージは、ステージコントローラによってステージ台の位置を決めることがでる。そして、移動ステージが固定台の方に動くことによって、クランパ間の間隔が縮まり、ヘテロコア部に曲率が発生する仕組みである。横河電子機器の開発している水位計は､ヘテロコア部にコア径が 3.8 μm のファイバを使った 9－4－9 型ヘテロコアセンサで、最大変位量は 1mm 未満として開発をおこなっている。創価大学では、9－4－9 型ヘテロコアセンサよりも挿入損失や最大損失の小さな 9－5－9 型ヘテロコアセンサを使い、横河電子機器のバックアップとなる基礎研究を行った。横河電子機器から、水位計で利用するダイヤフラムでも、最大変位量の要求が 5mm 程度でも可能とあり、創価大学の 9－5－9 型ヘテロコアセンサでは、最大変位量を 5mm とした。そこで、9－5－9 型ヘテロコアセンサにおけるクランパ間の初期間隔は 35mm とし、そこからクランパ間隔は 30mm まで近づくように設置している。9－5－9 型ヘテロコアセンサでは、この条件下で最大損失が数 dB 程度であって、破断の心配はなかった。9－5－9 型ヘテロコアセンサで、更に高感度な、すなわち、少ない移動量で大きな損失量を得るには、実験装置の初期間隔を更に小さく取ればよい。また逆に、タンデム接続を考慮した時のように、感度がそれほど必要で

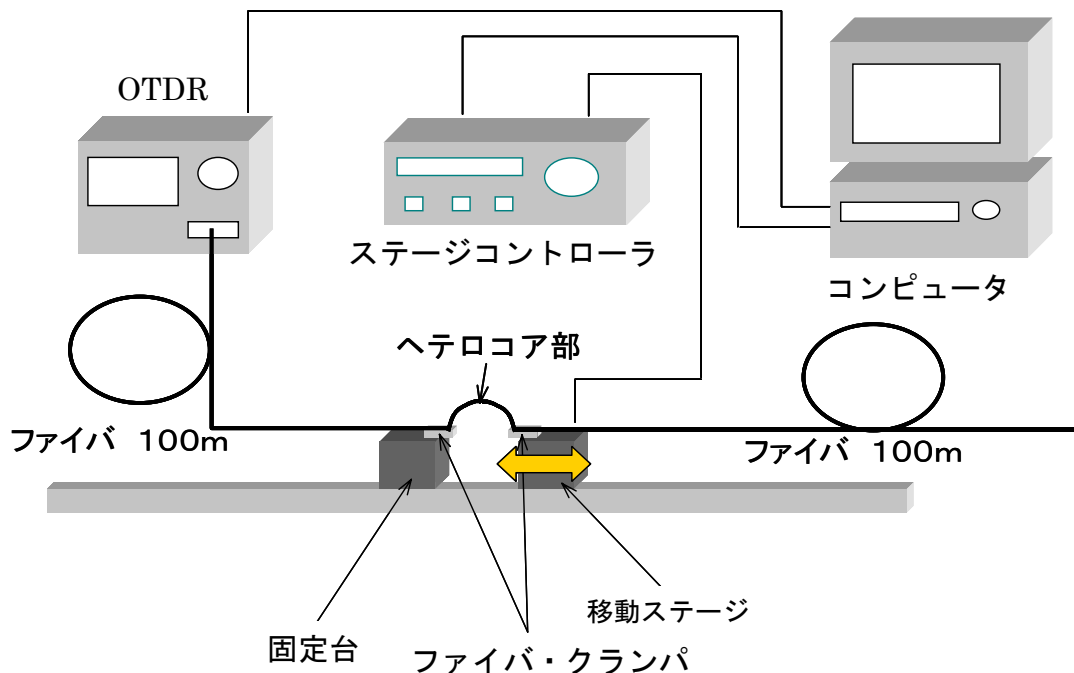



図 2.4.3　実験装置の概観

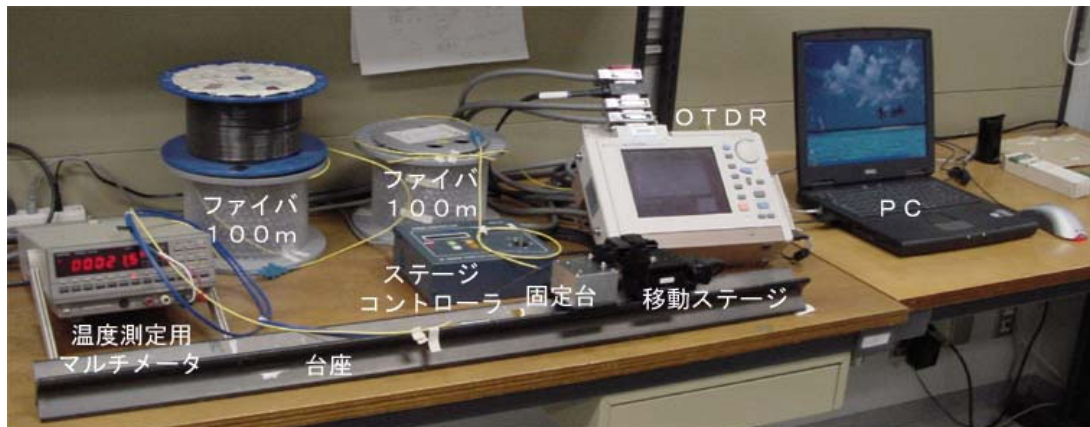



図 2.4.4　実験装置

ない時は、初期間隔を更に大きく取ればよい。但し、初期間隔を小さく取ると、曲げを与えたときのファイバへの負担は大きくなり、破断の可能性がある。ステージコントローラ、OTDR、マルチメータはコンピュータにつなげられており、GP-IB を使って制御する。

ファイバ長は、OTDR から 100m、ヘテロコア部を含むファイバが 5m、更に 100m つながっている。それぞれのファイバは、SC コネクタでアダプタを使って接続されている。ヘテロコア部を含むファイバ 5m の挿入損失は、コネクタ損失を含めて約 0.5dB 程度であり非常に小さな値である。創価大学で昨年度まで使っていた融着機で作成したヘテロコア構造センサは、コネクタ損失を含めて 2dB 弱であった。これは、新型融着機の導入により接続精度が格段に向上したためである。

C　挿入長

先にも述べたが、ヘテロコア構造センサは、伝送路ファイバのコア径よりも若干小さなコア径の小切片を挿入、融着した構造を有している。すなわち、このヘテロコア部として使用するファイバのコア径と長さが、センサの特性を左右することとなる。測定器に OTDR を使いタンデム接続を配慮すると、挿入損失はなるべく小さい方がよい。更に、センサ部に曲げを与えたときの損失量は、高精度なセンシングをおこなう際には大きく取る必要があるが、タンデム接続には不利な要素となる。創価大学では 5 μm のファイバをヘテロコア部に使用することにより挿入損失を 0.5dB 程度と低く押えられ、その最大損失量も小さいことが知られている。そこで、タンデム接続を考慮し、横河電子機器の水位計が必要とする、高精度タイプの物理検知センサとして最適なヘテロコア部の挿入長を求めた。

9－5－9 型ヘテロコアセンサにおける、高精度用のヘテロコア部の最適な挿入長を、実験的に求めた。高精度というのは、ヘテロコア部に曲げのない状態から、曲げを与えたときの損失の差が大きいほど良い。ただし、その損失は単調増加である必要がある。

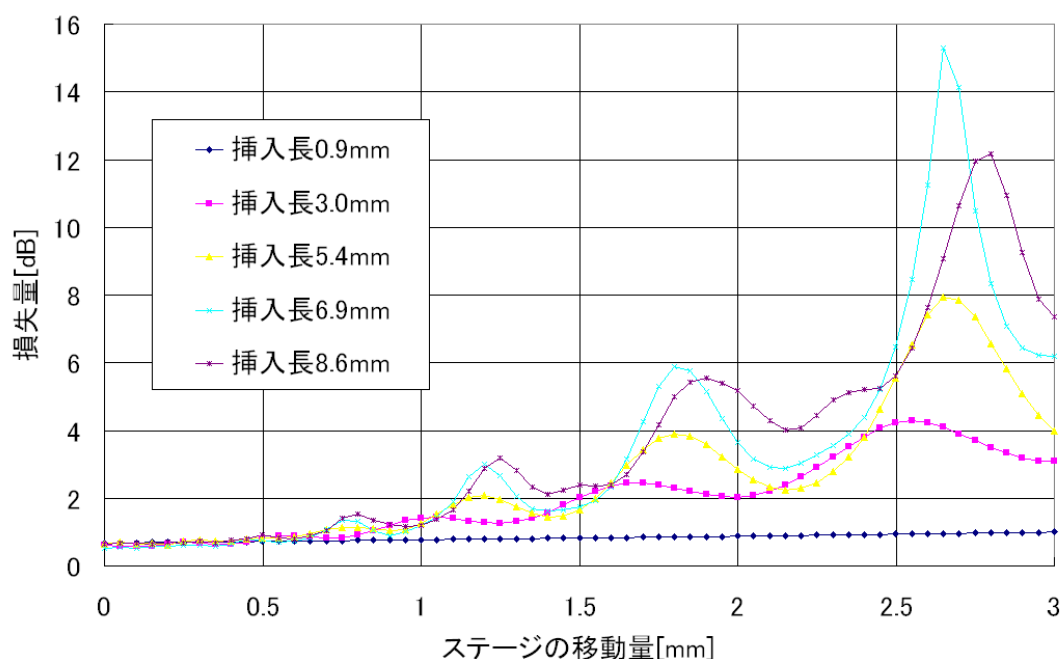



図2.4.5 挿入長の違いによるステージ移動距離と損失の関係

図 2.4.5 に挿入長を変えたときの、ステージ移動量と損失の関係のグラフを示す。挿入長約 1mm の時は、ステージ移動量に対して損失が単調に増加しているが、挿入長 3mm 以上では損失に揺らぎが見られた。ここで、センサとして利用するには、揺らぎのない 1mm のみであることが分かる。

次に、高精度用ヘテロコアセンサは、なるべく傾きが大きい方がよいということであり、挿入長を増やすと傾きが増す。すなわち、挿入長を徐々に増やし、揺らぎがぎりぎり見られない挿入長が、高精度用ヘテロコアセンサであることが言える。そこで、高精度に最適な挿入長を求めた。その結果を図 2.4.6 に示す。

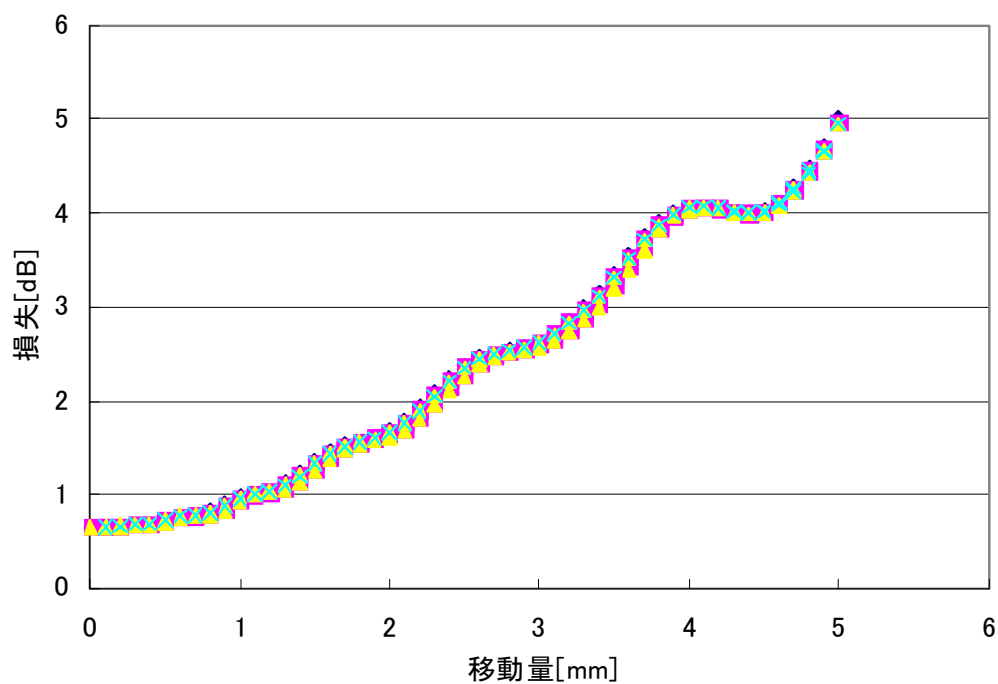



図2.4.6-1 挿入長2．2mmの時の移動量と損失の関係

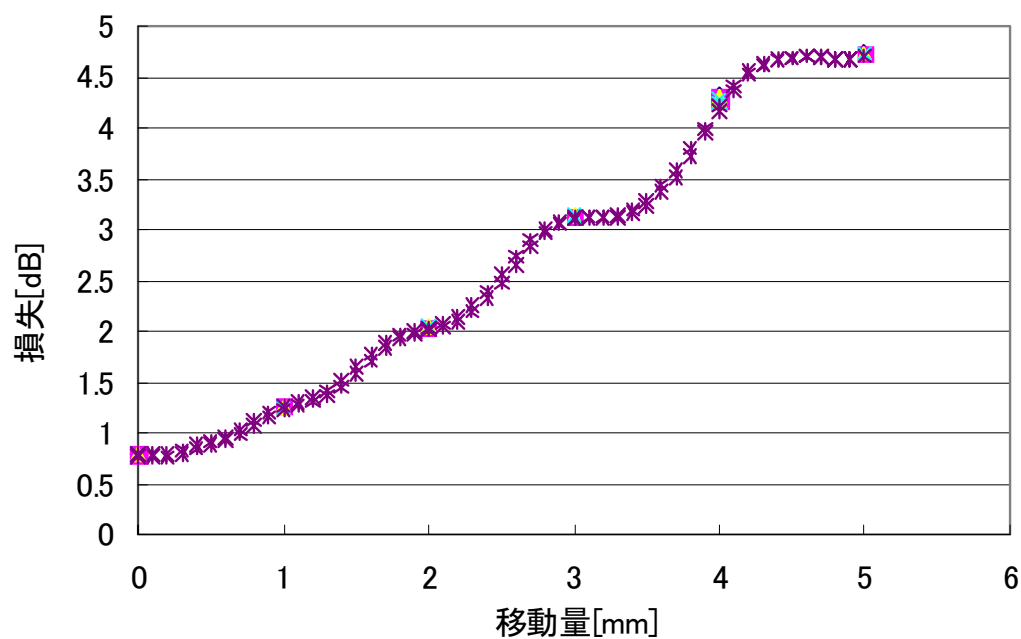



図2.4.6-2 挿入長1．9mmの時の移動量と損失の関係

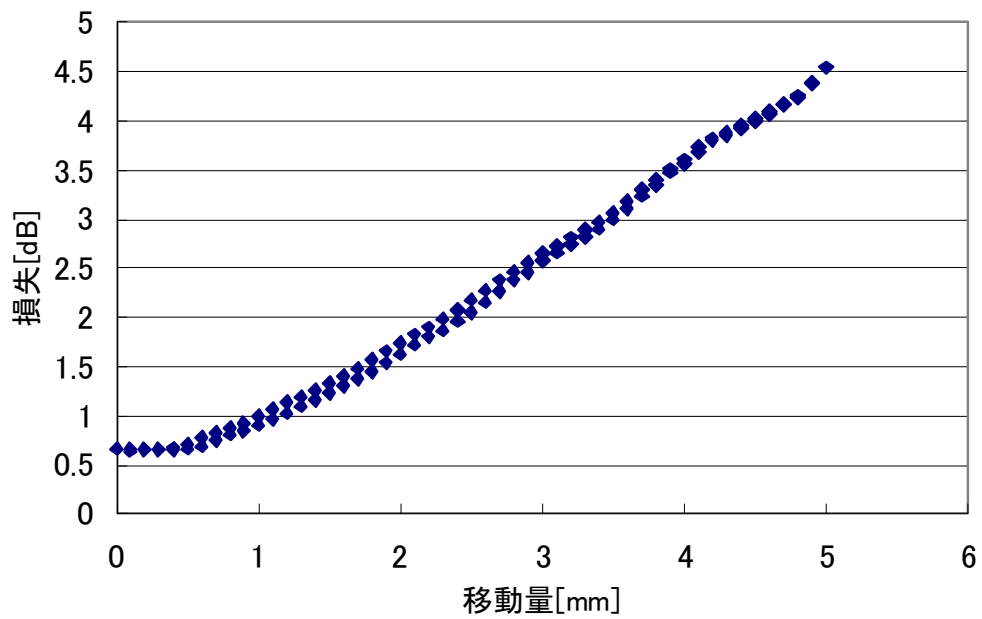



図2.4.6-3 挿入長1．８mmの時の移動量と損失の関係

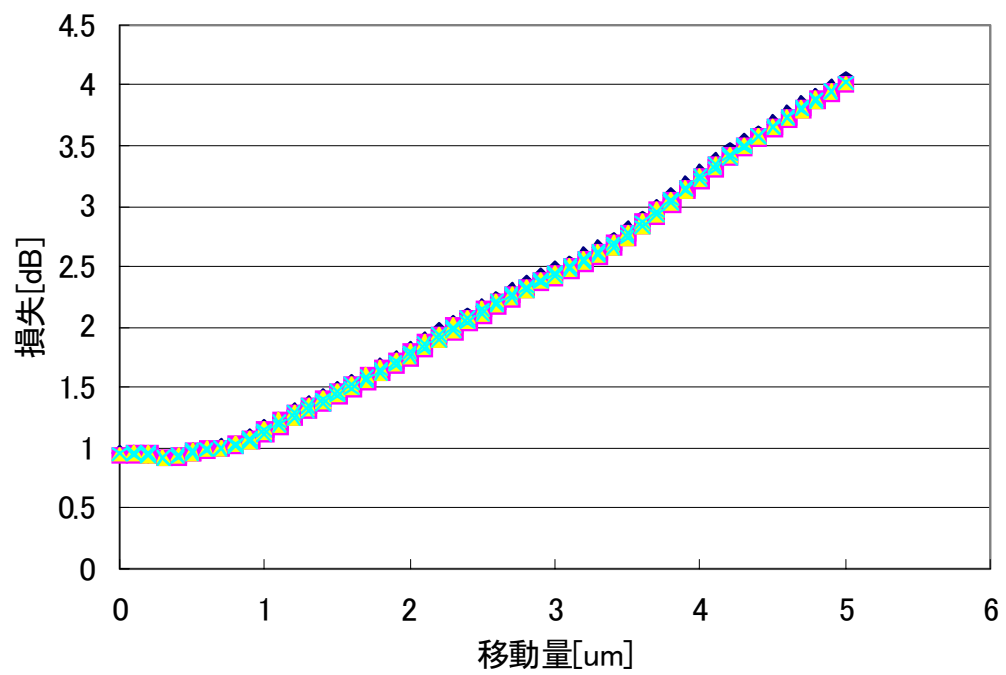



図2.4.6-4 挿入長1．５mmの時の移動量と損失の関係

図からも分かる通り、9－5－9 型ヘテロコアセンサの最適挿入長は 1.8mm であることがわかる。

D　精度評価

横河電子機器では、水位計が最大 10m の水位を 1cm 単位で識別することのできるものを開発している。すなわち、測定精度として 0.1％ということになる。創価大学では、9－5－9 型ヘテロコアセンサとして 0.1％を目指した。

Ｄ－１　精度評価方法

繰り返し測定精度は、移動ステージを移動させながら繰り返し測定をおこない、同じ位置の測定損失の標準偏差を求める。初期位置と最大移動時の測定損失の平均値差をフルスケールとして、先ほどの標準偏差を割る。その時の値が、繰り返し測定精度の％FS であり、0.1％が目標値である（式 2.4.1）。

$$\%FS_n = \frac{I_{sn}}{I_{A5} - I_{A0}} \times 100$$

I_{sn}：移動量nの標準偏差
I_{A5}：移動量５ｍｍの時の平均値
I_{A0}：移動量０ｍｍの時の平均値

式 2.4.1　精度評価式

Ｄ－２　温度の影響

最大変位量 5mm に対して精度 0.1％であるとすると、そのセンサは 5 μm の位置の差を見極められるものということになる。温度差による物質の変化によって、容易く 5 μm ほどの移動はありうると考えられる。実際に本実験環境における温度の影響を考えると、石英ガラスの線膨張率は約 0.5（$\times 10^{-6}$℃）である。これは、1m の石英ガラスは 1℃の変化によって 0.5μm だけ膨張するということである。

ヘテロコアセンサを含むファイバをクランプしている間隔は 35mm であるので、仮に 10℃の変化があったとしても、0.2μm 程度しか変化がないことになる。しかし、ファイバを押えているクランパや、そのクランパを固定している移動ステージや固定台、更には、それらを固定している固定台がある。これらは金属であり大部分がアルミである。アルミの線膨張率は約 23（$\times 10^{-6}$℃）である。仮に本実験装置で 10℃の変化があった場合は、約 8 μm の変化があることになる。高精度である 0.1％を配慮した実験では、温度による誤差は無視できないと考えられる。しかし、実験をおこなった部屋は空調されており、その温度変化は 1℃に満たない。本実験では、温度による誤差はさほど大きくないと考えられる。

Ｄ－３　その他の誤差原因

その他の誤差原因として考えられるのは、OTDR の測定誤差、移動ステージの繰り返し位置決定誤差、ヘテロコアセンサが曲げられることによって、その弾力よりもファイバ・クランパのファイバ保持力が負けて、ファイバの形状再現性に影響を及ぼしている、というものが考えられる。

OTDR は、光ファイバ内で起こるレイリー散乱という非常に微弱な光を、平均化処理することによって、ファイバ線上の分布情報を計測する。その平均化回数は数万回に及ぶが、誤差があることは否めない。OTDR の最小測定桁は 0.001dB であり、OTDR にヘテロコアセンサを含まないファイバのみの測定読み取り値の誤差は、約 0.001～0.002dB であった。

移動ステージは、ステッピングモータを利用しステージ台を移動させる。そのステッピングモータの性能や、ステッピングモータの回転をステージ位置の移動量に変換するための送りネジの構造から、必ずヒステリシスが存在する。本実験で使った移動ステージの仕様を表 2.4.1 に示す。

表 2.4.1　移動ステージ仕様

移動量	20mm
送りネジリード	0．5mm
1パルス移動量	0．5㎛
繰り返し位置決め精度	2㎛
バックラッシュ	5㎛

ファイバ・クランパの保持力による誤差は、ヘテロコアセンサの曲率から与えられる力は、全てファイバ・クランパの保持部分に集中し、ファイバが滑ると考えられる。実際に目で確認できるわけではないため明確ではないが、クランプ部分に工夫を加えることによって誤差は大きく変化することが実験的に分かっている。繰り返し誤差に関しては、一番大きな原因でないかと考えている。

Ｄ－４　精度測定実験

上記の評価方法で、温度や測定機の誤差を含んだ状態で、ヘテロコア構造センサの繰り返し再現性誤差を測定した。このときのヘテロコア構造センサは、作った状態のまま、すなわち、何もコーティングをしていない状態である。その時の結果を表 2.4.2 に示す。“行き”と“帰り”というのは、ヒステリシスを考慮したときの項目で、移動ステージの移動方向が、固定台に近づく方向を“行き”とし、遠ざかる方向を“帰り”としている。％ＦＳにおいて、0.1%以下になっていることが分かる。よって、本実験装置において、9－5－9 型ヘテロコアセンサは、最大移動量 5mm に対して誤差 0.1%が可能であることが示された。

表 2.4.2　ノンコーティングにおける繰り返し再現性

移動量[mm]	0	1	2	3	4	5
最小値[dB]	0.691	1.278	2.071	2.871	4.241	4.668
最大値[dB]	0.693	1.297	2.105	2.886	4.251	4.678
平均値[dB]	0.692	1.287	2.088	2.879	4.246	4.674
MAX-MIN	0.002	0.019	0.034	0.015	0.010	0.010
標準偏差	0.0008	0.0089	0.0155	0.0062	0.0033	0.0040
行き		0.0011	0.0023	0.0011	0.0019	
帰り		0.0008	0.0018	0.0020	0.0013	
%FS	0.021	0.224	0.390	0.156	0.084	0.101
行き		0.029	0.057	0.029	0.049	
帰り		0.021	0.046	0.051	0.033	

Ｅ　コーティング方法

光ファイバの基本構造はコアとクラッドからできている。しかし、ガラスは傷がつきやすいため、普通は 1 次被膜がクラッドを覆っている（図 2.4.7）。ヘテロコア構造センサは、融着機を使用し作成されるため、必ず1次被膜を除去しコアとクラッドのみの状態にする必要がある。作成されたヘテロコア構造センサは、クラッドが剥き出しになっており、放置しておくと空気やほこりなどによってファイバ表面にクラックが入る。クラックの入ったファイバは破断しやすくなる。この状態を避けるために、ヘテロコア構造センサを作成後、1 次被膜と同様にファイバを保護するコーティングを施す必要がある。

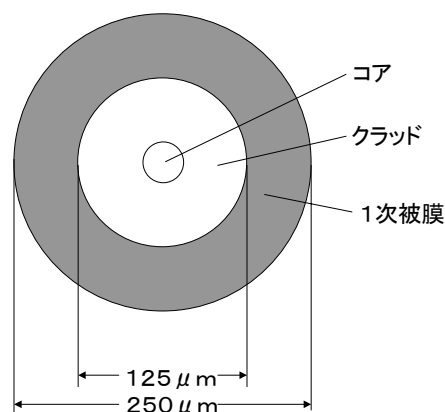



図 2.4.7　ファイバ断面図

コーティング材として有望と思われるものに、アロンアルファ、シリコン、リコータ、金属（特に金）などが考えられる。それぞれ特徴があり、精度評価に大きな影響を及ぼすと考えられる。それらを実際にコーティングしたときの、損失測定精度に影響があるか実験をおこなった。

Ｅ－１　アロンアルファ・コーティングの影響

創価大学では、かねてよりヘテロコア構造センサの研究を進めてきた。その上で、度々使っていたコーティング材としてアロンアルファがあった。ヘテロコア部の強度が増すことは経験的に分かっていたが、その性質から、曲率を与えた時にコーティング剤表面にクラックが入り、形状の繰り返し再現性に影響を及ぼす可能性がある。

アロンアルファ・コーティングにおける、繰り返し再現性誤差の実験結果を表 2.4.3 に示す。

表 2.4.3　アロンアルファ・ティングにおける繰り返し再現性

移動量[mm]	0	1	2	3	4	5
最小値[dB]	0.719	1.010	1.828	2.812	3.679	4.766
最大値[sB]	0.729	1.081	1.904	2.887	3.753	4.776
平均値[dB]	0.723	1.039	1.861	2.844	3.709	4.772
MA-MI	0.010	0.071	0.076	0.075	0.074	0.010
標準偏差	0.0040	0.0263	0.0303	0.0276	0.0257	0.0042
行き		0.0142	0.0121	0.0137	0.0197	
帰り		0.0055	0.0095	0.0109	0.0152	
%FS	0.098	0.649	0.749	0.682	0.636	0.104
行き		0.351	0.299	0.338	0.488	
帰り		0.135	0.234	0.269	0.375	

ほぼ全ての移動量に対して、0.1%を下回る結果は出ていない。アロンアルファは、固化したあと、ファイバに曲率を与えたときにクラックが入って、形状再現性誤差が増していると考えられる。

Ｅ－２　シリコン・コーティング

シリコンは、コーティング材としては弾性力があり、耐腐食性に優れていると考えられる。しかし、そのファイバへの付着には、刷毛やブラシでおこなう必要がある。その時、ファイバ表面には傷が付く可能性があり、その付着の様子によって形状の繰り返し再現性に影響があると思われる。

シリコン・コーティングにおける、繰り返し再現性誤差の実験結果を表 2.4.4 に示す。

表 2.4.4　シリコン・コーティングにおける繰り返し再現性

移動量[mm]	0	1	2	3	4	5
最小値[dB]	0.508	0.924	1.679	2.662	3.749	4.369
最大値[dB]	0.519	0.955	1.705	2.681	3.808	4.381
平均値[dB]	0.514	0.936	1.691	2.673	3.773	4.377
MAX-MIN	0.011	0.031	0.026	0.019	0.059	0.012
標準偏差	0.0042	0.0112	0.0099	0.0070	0.0231	0.0054
go		0.0070	0.0045	0.0042	0.0108	
return		0.0016	0.0032	0.0044	0.0045	
%FS	0.108	0.290	0.256	0.181	0.598	0.140
go		0.181	0.117	0.109	0.280	
return		0.042	0.083	0.113	0.117	

シリコン・コーティングは、部分によっては 0.1%を下回っているが、ノンコーティングのように完全に 0.1%を下回ってはいない。これは、コーティングを刷毛でおこなっているため、コーティングの不均一性による形状再現性誤差であると考えられる。

Ｅ－３　リコータ・コーティング

図 2.4.8　リコータ外観

リコータは、融着機を使用してファイバを接続した時のための、ファイバコーティング装置である（図 2.4.8）。コーティング材は、UV 硬化樹脂を利用している。直径 280 μm の円筒の型に中央にクラッド剥き出しのファイバを置き、UV 硬化樹脂を流し込み硬化させる（図 2.4.9）。

UV 硬化樹脂を利用しているため、UV の照射時間によってリコート部分の硬度が異なる。更に、ファイバの設置方法や、UV 硬化樹脂の流し込み方、円筒の型の形状不均一性によって、ファイバ表面に均一にコーティングできていないと考えられる。曲率を与えた時にコーティング剤表面にクラックが入り、形状の繰り返し再現性に影響を及ぼす可能性がある。この UV 硬化樹脂は、硬化後の屈折率は 1.51～1.53 くらいであって、石英系の光ファイバのクラッドに近い屈折率をもつ樹脂であるといえる。

図 2.4.9　リコーティング部分の拡大

リコータ・コーティングにおける、繰り返し再現性誤差の実験結果を次に示す。但し、リコート時の UV 照射時間が 35 秒のときが表 2.4.5 であり、20 秒が表 2.4.6 であり、15 秒が表 2.4.7 である。

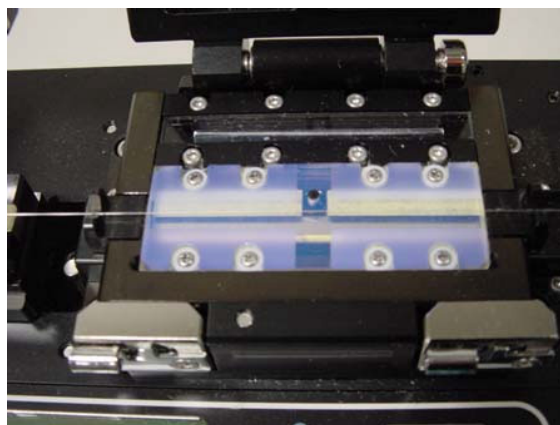



表 2.4.5　リコータ・コーティング（35 秒）における繰り返し再現性

移動量[mm]	0	1	2	3	4	5
最小値[dB]	0.626	1.180	1.981	2.979	3.938	4.830
最大値[dB]	0.633	1.204	2.014	3.003	3.975	4.834
平均値[dB]	0.628	1.189	1.994	2.990	3.955	4.832
MAX-MIN	0.007	0.024	0.033	0.024	0.037	0.004
標準偏差	0.0027	0.0084	0.0123	0.0086	0.0122	0.0016
行き		0.0045	0.0054	0.0035	0.0071	
帰り		0.0018	0.0020	0.0029	0.0061	
%FS	0.065	0.201	0.293	0.204	0.291	0.039
行き		0.107	0.128	0.083	0.168	
帰り		0.043	0.049	0.068	0.145	

表 2.4.6　リコータ・コーティング（20 秒）における繰り返し再現性

移動量[mm]	0	1	2	3	4	5
最小値[dB]	0.986	1.735	2.732	3.570	4.402	5.675
最大値[dB]	0.988	1.746	2.749	3.626	4.417	5.703
平均値[dB]	0.987	1.740	2.741	3.597	4.410	5.689
MAX-MIN	0.002	0.011	0.017	0.056	0.015	0.028
標準偏差	0.0008	0.0040	0.0073	0.0208	0.0055	0.0111
行き		0.0016	0.0013	0.0080	0.0061	
帰り		0.0013	0.0016	0.0070	0.0043	
%FS	0.018	0.086	0.155	0.441	0.117	0.236
行き		0.034	0.029	0.171	0.130	
帰り		0.028	0.034	0.148	0.092	

表 2.4.7　リコータ・コーティング（15 秒）における繰り返し再現性

移動量[mm]	0	1	2	3	4	5
最小値[dB]	0.569	1.096	1.755	2.542	3.387	4.053
最大値[dB]	0.571	1.117	1.779	2.561	3.404	4.059
平均値[dB]	0.570	1.105	1.766	2.551	3.394	4.056
MAX-MIN	0.002	0.021	0.024	0.019	0.017	0.006
標準偏差	0.0009	0.0082	0.0097	0.0078	0.0069	0.0024
行き		0.0025	0.0029	0.0017	0.0034	
帰り		0.0011	0.0011	0.0013	0.0016	
%FS	0.026	0.236	0.279	0.224	0.198	0.069
行き		0.073	0.083	0.048	0.096	
帰り		0.031	0.033	0.037	0.047	

リコータによるコーティングは、UV 硬化樹脂の硬化時間によって繰り返し再現性誤差が違うことがわかった。UV による硬化時間が 20 秒以上では 0.1%を下回ることがない。しかし、15 秒では 0.1%を下回っている。リコータ・コーティングの UV 硬化時間 15 秒では、アロンアルファ・コーティングのようなクラックによる形状再現性や、シリコン・コーティングのようなコーティングの不均一性による誤差は見られない。しかし、UV 硬化時間を増やすとコーティングが硬くなり、アロンアルファ・コーティングのようなクラックが入り、形状再現性の誤差として現れると考えられる。たとえ UV 硬化時間を 15 秒にしたとしても、放置しておくと太陽光などで UV は更に硬化されると考えられる。すなわち､センサユニットが完全に密閉され遮光されていれば有効なコーティングと言えるが、その他の場合は好ましいコーティングとは言えないと思われる。

Ｅ－４　金・コーティング

金は、金属の中では耐腐食性に優れ、スパッタ蒸着機によってファイバ表面にほぼ均一にコーティングすることができる。ガラスに蒸着された金は剥離しやすいが、金の下地にクロムを蒸着することによって、それを回避することができる。金属は弾性力もあり、繰り返し再現性に影響を及ぼしにくいと考えられる。クロムの膜厚は 5nm で、金の膜厚は 200nm とした。

金のコーティングの際は、スパッタ蒸着装置にヘテロコア部のみを入れる必要があるため、ヘテロコア部前後含めて約 13cm にしなければならない。であるため、スパッタ蒸着後、ヘテロコア部を伝送路と融着する必要があり、ヘテロコア構造センサ作成の工数が増えることになる。

金・コーティングにおける、繰り返し再現性誤差の実験結果を表 2.4.8 に示す。

表 2.4.8　金・コーティングにおける繰り返し再現性

移動量[mm]	0	1	2	3	4	5
最小値[dB]	0.666	1.228	1.979	2.851	3.897	4.517
最大値[dB]	0.676	1.243	2.005	2.864	3.914	4.524
平均値[dB]	0.670	1.235	1.992	2.858	3.906	4.519
MAX-MIN	0.010	0.015	0.026	0.013	0.017	0.007
標準偏差	0.0036	0.0064	0.0112	0.0055	0.0067	0.0028
行き		0.0013	0.0015	0.0013	0.0016	
帰り		0.0017	0.0019	0.0015	0.0026	
%FS	0.094	0.166	0.291	0.144	0.175	0.072
行き		0.034	0.039	0.034	0.041	
帰り		0.043	0.050	0.039	0.067	

金のコーティングは、“行き”と“帰り”、全てで 0.1%を下回っている。金のコーティングは、他のコーティングに比べて、ほぼ均一にコーティングできていることと、弾性がありクラックが入りにくいことから、繰り返し再現性がよく、ほぼノンコーティングと同等の誤差が認められた。

２．５　環境検知型センサ

次に環境検知型センサについて説明する。環境検知型センサは伝送路用ファイバとしてマルチモードファイバを用い、この任意位置を切断し、センサ部として数十 mm のシングルモードファイバ小切片を挿入・融着することで作製される（図 2.5.1）。このように伝送路とセンサ部に用いるファイバにコア径の違いを持たせる事で、伝送路を伝搬する光波がセンサ部との境界面においてクラッド層へと大きく漏洩することになる。この漏洩光のうち、センサ部ファイバのクラッド層と外界との境界面で全反射するような光波が存在する場合には､エバネッセント波と呼ばれる境界面から外界側に波長程度染み出す波が生じる。このエバネッセント波は外界側に一旦は存在することになるが、放射光とはならず、再び内部へ閉じ込められて伝搬していく波である。この性質から、エバネッセント波は外界に接する物質の特性に影響を受ける。つまり、外界の情報を伝搬光に乗せることが可能となる。このエバネッセント波の励起は環境検知型センサに利用する表面プラズモン現象に必要なものであり、ヘテロコア構造ファイバのように切断・融着といった簡便な方法で実現可能であることは、他のファイバセンサの構造に対して明らかな優位点であると考えられる。

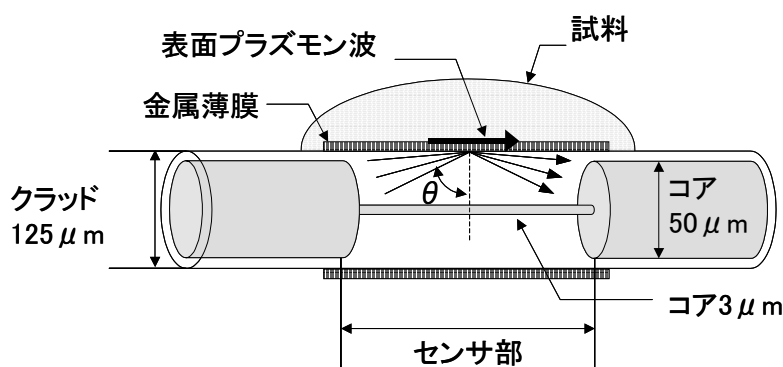



図 2.5.1　環境検知型ヘテロコア光ファイバ

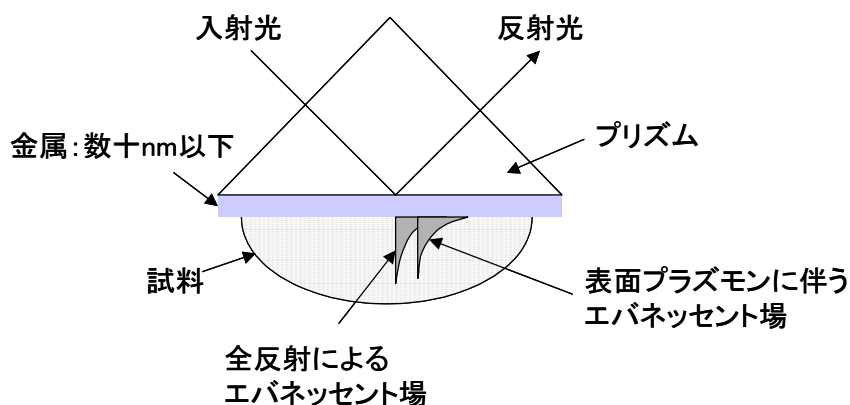



図 2.5.2　Kretschmann 光学系

２．６　表面プラズモン共鳴（SPR：Surface Plasmon Resonance）

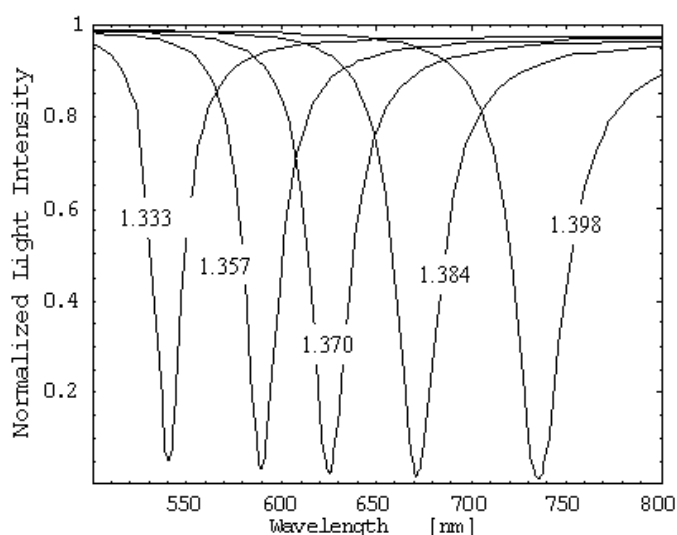
環境検知型センサは表面プラズモン共鳴（以下 SPR）を利用した屈折率センサである。SPR は金属表面に関与した現象であり、金属表面に接する媒質のもつ屈折率を高精度・高感度に測定可能な現象として広くしられている。図 2.5.2 に SPR に最もよく使われる Kretschmann 光学系を示す。Kretschmann 光学系では高屈折率なプリズムとその底面に蒸着される数十 nm の金属薄膜により構成され、さらに金属に接する媒質を含めた 3 層の構造として取り扱う事で理解される。

このような構造に、プリズム内に光を入射し、金属との境界面において臨界角度以上の反射が行われると、エバネッセント波が生じる。このエバネッセント波は境界面から急激に減衰を見せる波であるが、プリズムに蒸着される金属が波長と比較して薄いものである為、金属と試料媒質との境界面まで達する。この光のエネルギを利用して表面プラズモン波（SPW）は金属と試料媒質の境界面で励起される。SPW を励起する事で、入射光のエネルギーの一部が使用されて反射光エネルギの減衰として観測される。減衰の得られる光のうち、SPW を共鳴励起することが出来る条件は限定されており、一般に、光の反射角度と波長に依存する。つまり、これら 2 つのうちどちらかを観測する方法が SPR センサの基本的な原理となる。ここで、重要な点は SPW の共鳴励起条件が金属に接する試料媒質の屈折率によって変化することであり、逆に考えると共鳴励起条件を観測することで、試料媒質の屈折率を知ることが出来る性質である。

２．７　SPR シミュレーション

図 2.7.1 にコンピュータ上で行った数値計算結果を示す。この計算では多くの波長を含む光がプリズムと金属との境界面において角度 85°で反射したと仮定している。縦軸は入射光と反射光のパワーの比（強度反射率）を、また、図中の数値は金属と接する試料媒質の屈折率を表している。

図 2.7.1　SPR シミュレーション

図から明らかなように、シミュレーションでは、各屈折率に対し特徴的なディップ状の SPR カーブ（以降、カー

ブの最深部を共鳴波長と記述）が得られ、試料媒質の屈折率が増加するに従ってそのカーブが長波長側へと推移する結果となった。このことから、基礎的な実験を行うにあたっては、可視光領域の光源を用いることが妥当であることが分かる。

２．８　スパッタリングによる金属薄膜の成膜

上記したように、SPR センサは高屈折率のプリズムと金属の薄膜により構成される。この構成はヘテロコア構造の光ファイバにおいては、プリズムをファイバセンサ部のクラッド層と置き換えることが出来る。そこで、センサ部クラッド層の外周にスパッタリング法を用いて、金属薄膜の成膜を行った。成膜される金属は SPR に一般的に利用される、銀（Ag）と金（Au）である。

使用したスパッタ装置（芝浦メカトロニクス（株）CFS-4ES-231）外観とチャンバー内部の概要を図 2.8.1(a)(b) に示す。このスパッタ装置は金属、絶縁物等の薄膜形成に適し、以下に挙げるような特徴を持つ。

・3 つのターゲットを取り付けることができることから、3 種類の金属薄膜を連続して形成することができる。このため、金などの比較的ガラスとの密着力が弱い金属薄膜をガラス上に形成する際には下地にクロムを使うことが可能となる。
・マグネトロン方式であるので、製膜速度が速い。
・スパッタパワー、スパッタ時間を制御することが可能であるので、精密な膜厚制御が可能である。
・サイドスパッタ方式である為、ダストの影響が少ない。

(a)

(b)

図 2.8.1　(a) スパッタ装置外観、(b) チャンバー内部

更に、本装置には基板上にファイバを回転させる機構（以下回転治具）を芝浦メカトロニクス（株）社と共同開発し、設置した（図 2.8.2)。一般に、スパッタ装置ではスパッタテーブルにガラスなどの基板を固定し、テーブルを回転させる事で均一な金属膜を成膜する。この方法は、細径かつ円筒状の光ファイバ全周囲に金属膜を成膜することが困難であると考えられた。そこで、本装置にはテーブルの回転をファイバの回転に変換する機構を考案した。この回転治具は長さ約 145mm の光ファイバ 8 本を保持することが可能で、治具の中心を軸として回転する事で、全ファイバの全周囲に均一な金属膜を成膜するものである。

２．９　膜厚校正

前セクションに述べたように、ファイバの回転機構を設けた為、ファイバ周囲に成膜される金属の膜厚を把握する必要性が生じた。そこで、実際にスパッタを行い、SEM による膜厚測定を行って、スパッタ条件と膜厚の関係を求めた。以下にスパッタ条件を挙げる。

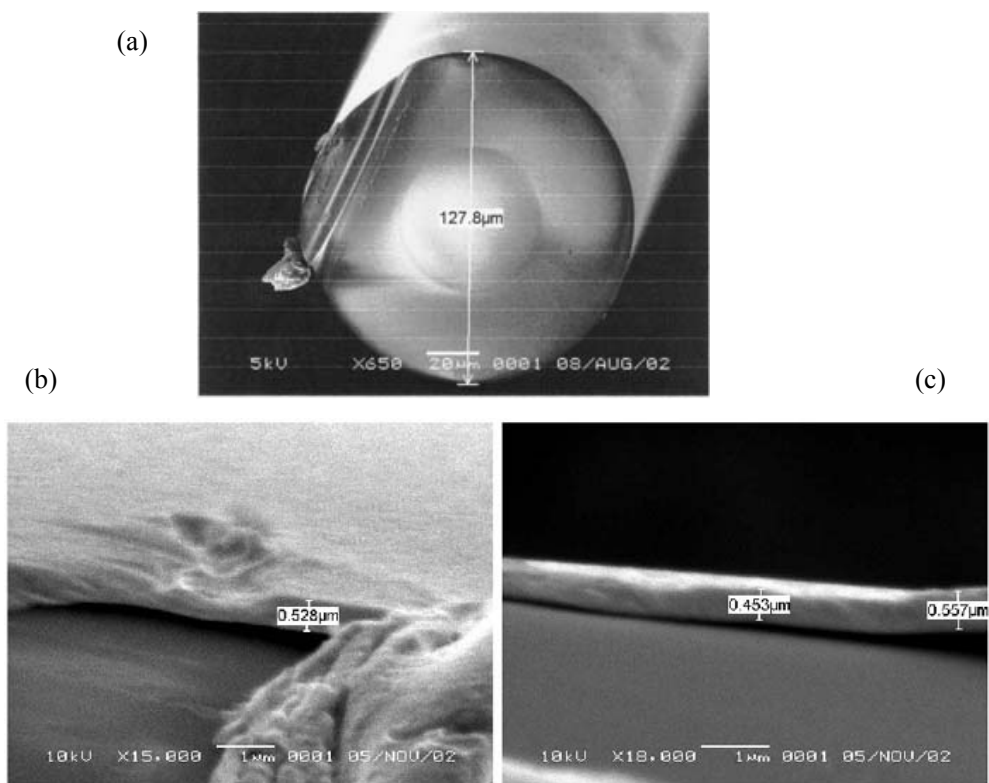



図 2.8.3　SEM 撮像写真　(a) ファイバ断面、(b, c) ファイバ表面拡大

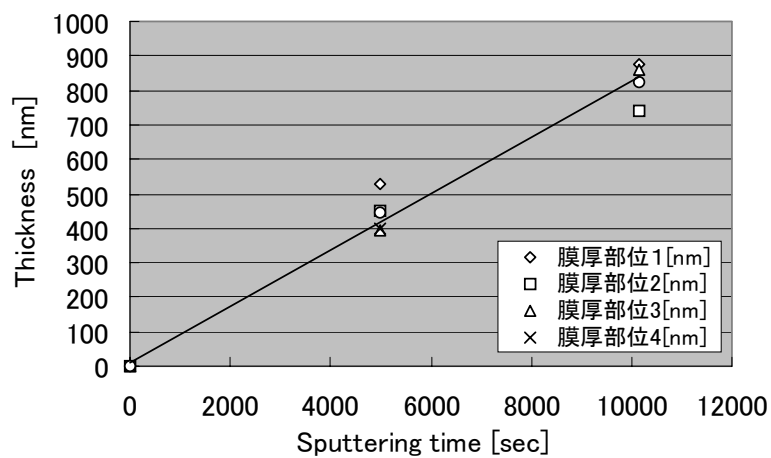



図 2.8.4　膜厚校正（金）: スパッタ時間と膜厚の関係

・真空到達度　　　　　　　　4.0×10^{-4} [Pa]以下
・アルゴン（Ar）ガス流量　　　21 [SCCM]
・Ar ガス導入後気圧　　　　　5.0×10^{-5} [Pa]程度
・スパッタテーブル回転速度　　35 [rpm]
・スパッタパワー　　　　　　　50 [W]
・使用金属　　　　　　　　　　金（Au）

上記条件でスパッタ時間を変化させてサンプルを作製した。SEM による撮像写真を図 2.8.3 に示す。図 2.8.3(a)は光ファイバ断面図の撮像写真であり、光ファイバの基本的な 2 重構造であるコア層とクラッド層が鮮明に写っている。このとき測定したファイバの直径は 127.8 μm であり、ファイバの保証値であるクラッド径約 125 μm とほぼ一致している。

このようなファイバのクラッド層表面を拡大し、図 2.8.3(b，c)に示すような部分的に金膜が剥離している個所を 3～4 点探し、膜厚の測定を行った。得られたスパッタ時間と膜厚の関係を図 2.8.4 に示す。図中の実線は膜厚データの平均値に対する近似直線を表しており、このラインからも読み取れるように、スパッタ時間とファイバ表面に形成される金膜厚の間にはほぼ線形の関係にあることが分かった。実際には、SPR に適用できる金属膜厚は数十 nm であるため、スパッタを行う時間に換算すると 1000 秒以下となる。この時間は膜厚制御の容易さと成膜速度の観点から、適度な値であると考えられた。

２．１０　実験装置構成

基本的な性質を把握する為に行ったスペクトル測定実験に使用した、実験装置構成概要と外観をそれぞれ図 2.10.1 と図 2.10.2 に示す。この構成では光源として波長範囲 400-

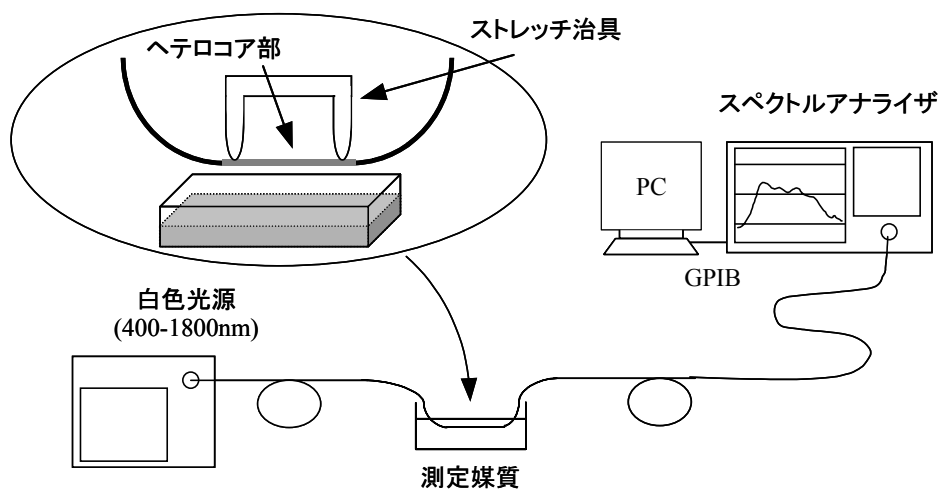



図 2.10.1　実験装置概要

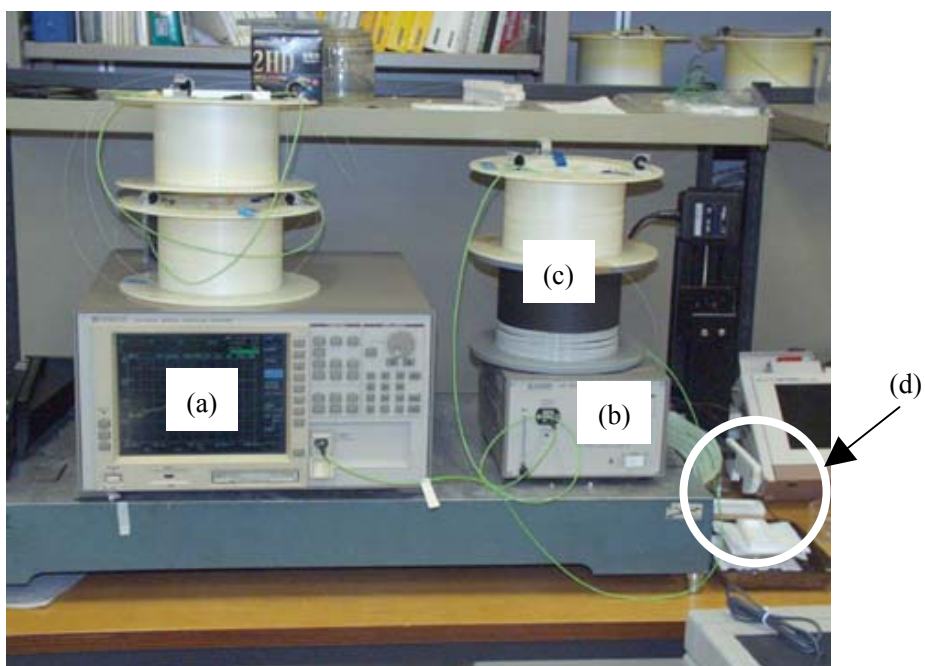



図 2.10.2　実験装置外観　(a) スペクトルアナライザ (b) 白色光源 (c) 伝送路ファイバ (d) センサ部

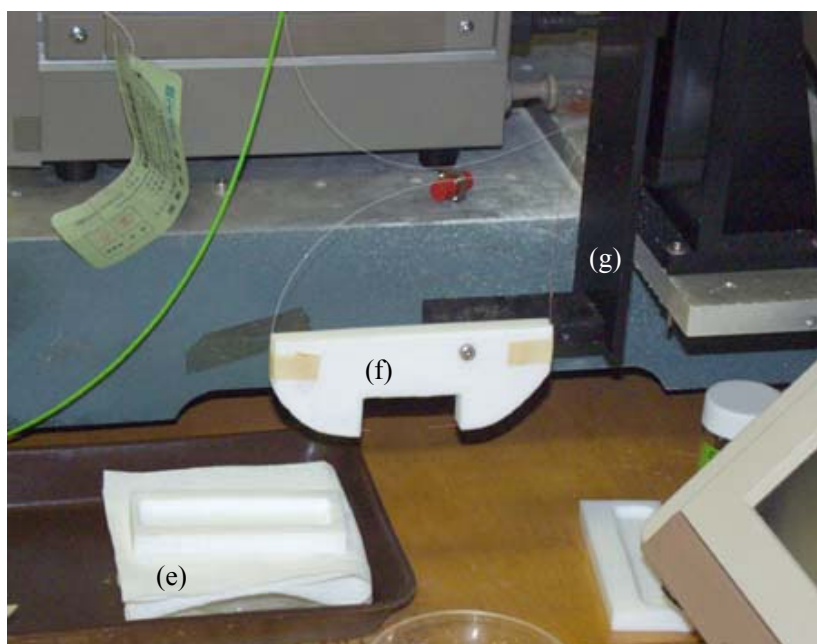



図 2.10.3　センサ部写真　(e) 溶液を注入するベッセル　(f) テフロンアーム治具　(g) 1 軸ステージ

1800nm を含むハロゲンランプ白色光源を用いた。伝送路ファイバの一端より入射された光はセンサ部（ヘテロコア部）においてひとたびクラッド層へ漏洩し、外界との相互作用が生じる､その後センサ部終端において再び部分的に伝送路ファイバにリカップルされる。伝送路ファイバ出射端にはスペクトルアナライザを接続し、到達した光波のスペクトルを

測定する。測定される媒質には取り扱いの容易なグリセリン水溶液を用いた。

センサ部は、テフロン板で作製したアーム状のストレッチ治具により直線状に形状した（図 2.10.3(f)）。アーム治具は 1 軸モータステージ（同図(g)）に取り付け、これを上下させることにより、ベッセル（同図(e)）に満たされた溶液中に完全に浸水させる。再現性のよい実験とするため、ステージは GPIB 通信により PC から制御した。

光源とスペクトルアナライザの主な仕様及び特徴を以下に挙げる。

[白色光源：安藤電気株式会社製・AQ-4303B]

・波長範囲　　400～1800nm
・出力レベル　　-45dBm/10nm（GI50／125 ファイバ、CW 光 850．1300nm）
・出力レベル安定度　　±0.05dB 以内（20℃、1 時間）
・発光素子　　ハロゲンランプ
・光コネクタ　　FC 形光コネクタ

[スペクトルアナライザ：安藤電気株式会社製・AQ-6315A]

・測定波長範囲　　350～1750nm
・波長確度　　±0.5nm（25±5℃、10/125 SM ファイバ）
・波長繰り返し再現性　　±0.005nm（1 分間）-
・波長分解能　　0.05～10nm
・レベル確度　　±0.3dB（633/1310/1550 において）
・光コネクタ　　FC 形光コネクタ

２．１１　実験（使用金属の比較）

SPR に一般的に利用されている金属は銀と金である。両金属の中では銀がより鮮明な SPR スペクトルが得られることが知られている。一方で、金は物質として安定した金属であり使用しやすい特徴を持つ。そこでまず、この両金属を用いて膜を形成し、実験を行った。

図 2.11.1(a)、(b)に厚さ 31.7nm の銀と厚さ 34.7nm の金をファイバ表面上に形成したファイバを用いて行った実験結果を示す。実験は異なる濃度のグリセリン水溶液中にファイバのセンサ部を完全に浸水させて測定を行った。使用したグリセリン水溶液濃度は 0、10、20、30、40、50％で、図中の数値はそれぞれの濃度に対応する屈折率（R.I.）1.333～1.398 を示している。グラフの縦軸は外界（センサ部に接する媒質）が空気であった場合のスペクトルを基準とした強度変化を表している。外界が空気の場合には屈折率は約 1.0003 であり、理論的には可視光領域において共鳴波長が観測されることは無いため、基準値として採用した。

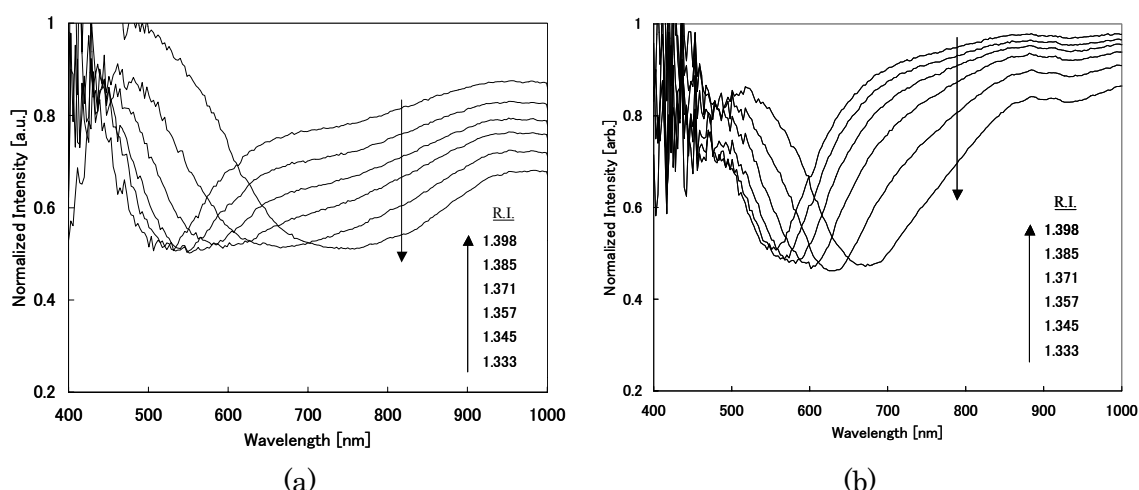



図 2.11.1　SPR スペクトル　(a) 銀 : 31.7nm　(b) 金 : 34.6nm

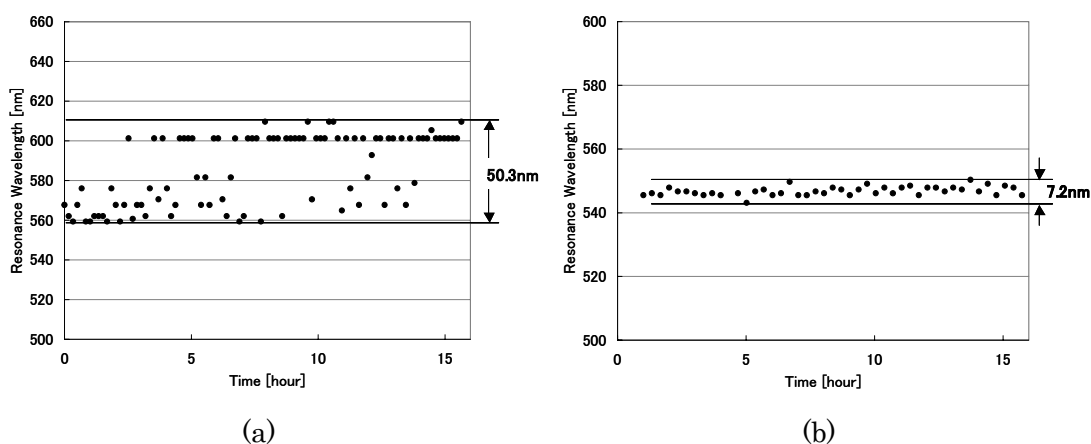



図 2.11.2　共鳴波長の時系列変化　(a) 銀 : 31.7nm　(b) 金 : 34.6nm

両グラフからは屈折率の増加に伴って共鳴波長が長波長側へと推移していることが分かる。この性質は、シミュレーションとも一致している。このことから、ヘテロコアファイバの SPR センサへの利用が可能であることが確認され、金属としては銀と金の両方を利用することが出来ることが分かった。両金属のスペクトルを比較すると、両者共に広がったスペクトルとなっている。特に、銀を用いた場合の方がその広がりは顕著であり、強度変化型の SPR センサ（次セクションに記述）としては銀の利用が望ましいことが分かる。

一方で、銀は酸化しやすい金属として知られ、センサとしての寿命が問題となる。そこで、センサとしての時間安定性を知るために時系列測定実験を行った。図 2.11.2 にセンサ部を水（屈折率 1.333）に浸水させたまま、20 分間隔 16 時間の測定を行った結果として、時間経過と共鳴波長の関係を示す。銀の結果（同図(a)）からは時間経過と共に共鳴波長が大きく変化し、最大で 50.3nm 変動した。この原因はやはり銀の酸化であると考えられ、16 時間程度で酸化がかなり大きく進行することから、単層の銀のみではセンサとしての利用が困難であると考えられた。

一方で、金の場合（同図(b)）には時間経過に伴う共鳴波長の大きな変化は無く、その振れ幅も 7.2nm に抑えられている。この変化の度合いは、水温による屈折率の揺らぎや、白色光源とスペクトルアナライザからなる測定系の不安定性によるものと理解することができる。このことから、センサとしては金を用いることが有用であることが示された。

２．１２　実験（金膜厚の効果）

この実験ではファイバのセンサ部に成膜される金属にクロムと金を使用した。金は物質として安定した金属であるが、その一方で、ガラスなどとの吸着が弱く、剥離しやすい性質をもつ。このことから、より強い吸着とする為に中間層としてクロムを形成した。

図 2.12.1(a,b)は典型的な結果として、ファイバ表面上にクロムを 4.4nm 形成し、その上に 32.6nm、57.0nm の金を成膜したものを用いて行った実験のスペクトルを示している。

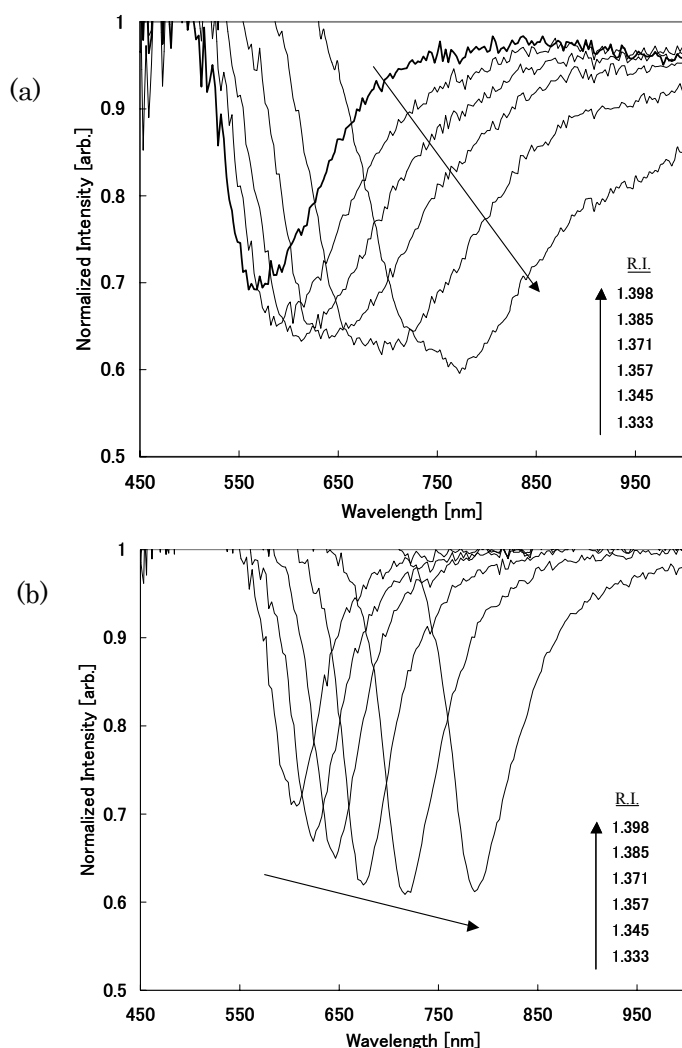



図 2.12.1　SPR スペクトル　(a) Cr:4.4nm, Au:32.6nm　(b) Cr:4.4nm、Au:57.0nm

両実験結果において注目すべき特徴は、スペクトルが共鳴波長から左右に広がった平たい形態となることであり、この特徴は金の膜厚が小さな値であるほど顕著になることである。これはシミュレーションでは得られなかった特徴であり、単一波長光源と受光素子の組み合わせといった簡便なセンサシステムの構築が可能であることが認められた。つまり、光源として LED や LD を用い、受光素子として PD 等を利用すれば、一つの基板上にセンサ回路を集積可能で、ハンディなセンサ製作が可能であると考えられる。図 2.12.2 は波長 850nm での、3 種類の金膜厚に対する損失変化を示している。3 種類の結果の内、金膜厚 32.7nm のものが屈折率変化に対し単調な変化が得られており、かつ、屈折率変化 1.33～1.4 に対して約 1.32dB と最大の損失変化が得られている。このことから、単一波長光源

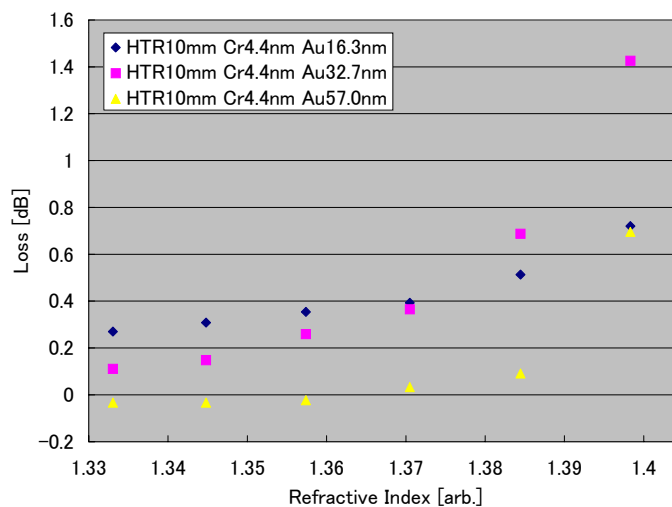



図 2.12.2　波長 850nm での損失変化（金膜厚：16.3，32.7，57.0nm）

を利用した強度変化型の SPR センサとしては、32.7nm がヘテロコアファイバに対しては適度な金膜厚であると考えられる。

２．１３　光マルチメータによる測定

本センサを用いることにより、単一波長光源、及び受光素子を組み合わせたセンサシステムの製作の可能性が確認された。そこで、LED、PD を使用した計測器である光マルチメータ（波長 850nm）を用いて測定を行い、現在の実験構成での本センサの特性を調べた。

実験装置を図 2.13.1 に示す。長さ 10mm ヘテロコア部に Au（32.6nm）/Cr（4.4nm）薄膜を形成した 50-3-50 ヘテロコア型光ファイバにグリセリン水溶液（濃度 0、10、20、30、40、50%）を付着させ、光マルチメータによって測定する。光源は LED ユニット（波長 850nm）を用いた。ヘテロコア部は直線状にし、ヘテロコア部両端には、約 50m の伝送路ファイバを設けている。図 2.13.2 に、実験に用いた金 32.6nm、クロム 4.4nm のスペクトルを示す。図中の数値は、グリセリン濃度に対応する屈折率である。

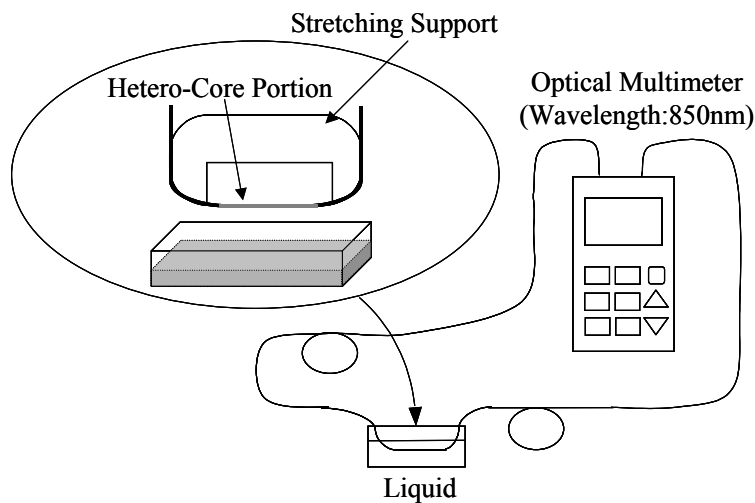



図 2.13.1　実験構成（光マルチメータ）

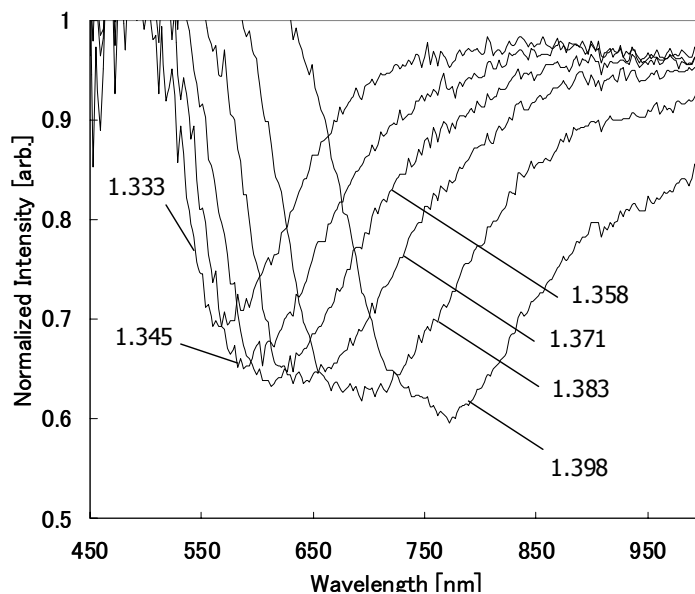



図 2.13.2　SPR スペクトル (Au : 32.6nm, Cr : 4.4nm)

Ａ　精度評価方法

空気、及びグリセリン水溶液（0～50%）中で測定を繰り返し 5 回行い、空気中での測定値に対する損失の標準偏差を求める。グリセリン水溶液 0%と 50%の損失の変化量をフルスケールとして標準偏差で割る。この値が測定精度%FS であり、フルスケールをグリセリン水溶液 0～50%に対する屈折率 1.3330～1.3980 として誤差を換算したものが N%FS である。

$$\%FS = \frac{SD_n}{G_{50} - G_0} \times 100$$

$$N\%FS = \frac{(N_{50} - N_0) \times \%FS}{100}$$

SD_n：グリセリン水溶液 n%の標準偏差
G_{50}：グリセリン水溶液 50%の平均値
G_0：グリセリン水溶液 0%の平均値
N_{50}：グリセリン水溶液 50%の屈折率
N_0：グリセリン水溶液 0%の屈折率

式 2.13.1

B　結果

測定結果を表 2.13.1 に示す。%FS は 0.0264～0.4382%、N%FS は 0.00002～0.0003 であり、本センサを用いてショ糖濃度を測定する場合の感度は、0.2±3%となる。また、時間経過による精度の変化はほとんど見られなく、繰り返し再現性としては安定した結果を得ることができた。

表 2.13.1　繰り返し再現性

a)　初期測定

グリセリン濃度[%]	0	10	20	30	40	50
屈折率	1.3303	1.3434	1.3567	1.3702	1.3839	1.3978
最大値[dB]	0.5643	0.6765	0.8530	1.1367	1.6726	2.7731
最小値[dB]	0.5376	0.6752	0.8369	1.1326	1.6532	2.7532
平均値[dB]	0.5532	0.6755	0.8498	1.1334	1.6578	2.7580
標準偏差	0.0097	0.0006	0.0072	0.0018	0.0084	0.0086
%FS	0.4382	0.0264	0.3257	0.0826	0.3827	0.3904
N%FS	0.0003	0.00002	0.0002	0.0001	0.0002	0.0003

b)　100 時間後

グリセリン濃度[%]	0	10	20	30	40	50
屈折率	1.3303	1.3434	1.3567	1.3702	1.3839	1.3978
最大値[dB]	0.5815	0.7166	0.8973	1.2129	1.7924	3.0774
最小値[dB]	0.5574	0.6924	0.8732	1.1926	1.7726	3.0533
平均値[dB]	0.5725	0.6973	0.8859	1.1976	1.7814	3.0620
標準偏差	0.0090	0.0108	0.0117	0.0088	0.0102	0.0121
%FS	0.3609	0.4336	0.4707	0.3542	0.4095	0.4845
N%FS	0.0002	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003

C　温度依存性について

表 2.13.1 で繰り返し再現性は確認できたが、各実験において損失値にばらつきが生じている。この原因としては、測定対象であるグリセリン水溶液の温度変化が考えられる。そこで、測定対象の温度測定を考慮して実験を行った。

作製したファイバの金属膜厚は Cr-4.4nm、Au-32.6nm、ヘテロ部長さは 10mm であり、実験構成は以下の通りである。

- 計測器：光マルチメータ（ANDO、AQ2140A）
- 光源：LED ユニット（ANDO、AQ4215、波長 850nm）
- 検出：センサユニット（ANDO、AQ2730）
- 試料：スクロース水溶液（0～50%：屈折率 1.3330～1.4200）
- センサ部形状：テフロン板アームにより直線形状
- アーム：1 軸モータステージに取り付け、上下させることで溶液中に浸水
- 温度測定：(テクノ・セブン、D617：確度 1/10℃)

スクロース水溶液 0-50%に対するスペクトルを図 2.13.3 に示す。

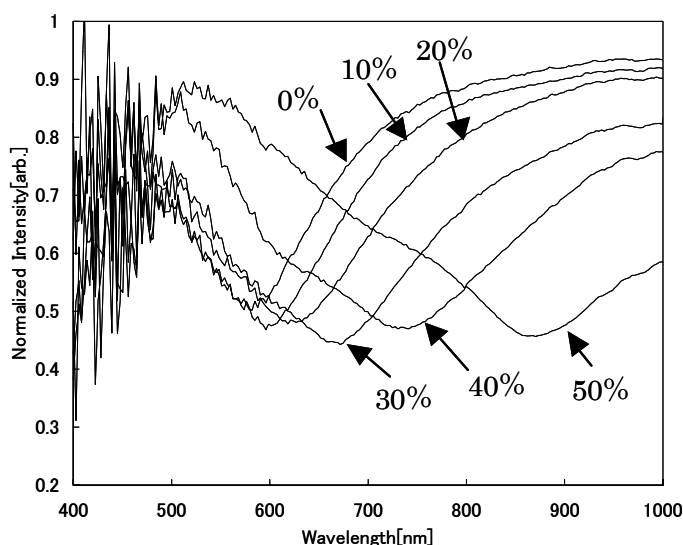



図 2.13.3　スクロース水溶液 0-50%に対するスペクトル変化

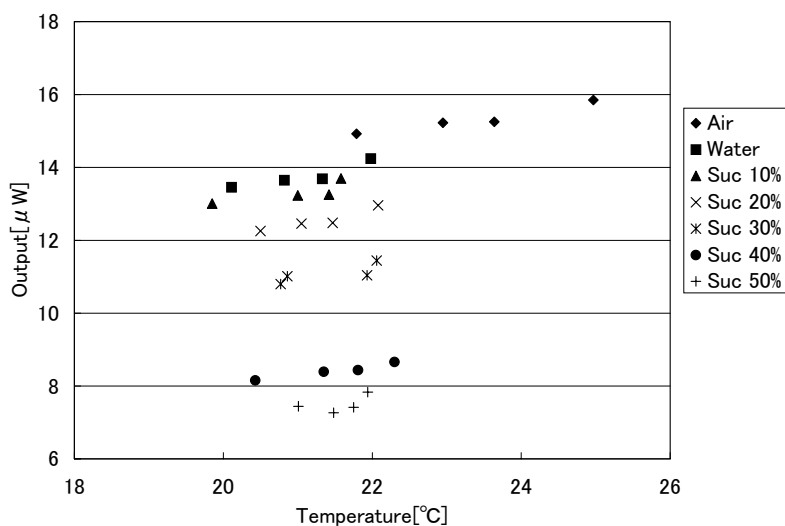



図 2.13.4　温度変化による出力変化

D　結果・検討

図 2.13.4 が温度と測定値の関係である。スクロース濃度が増加すると出力が減少していることがわかる。各濃度のグループに注目すると、それぞれ温度が高くなると出力が増加する傾向が見られる。このことは、濃度が変わらないとすると、液体が温度上昇に伴って屈折率が減少したためであると考えられる。水の屈折率は、20℃から 25℃になると約 0.0005 変化する。これは%FS で約 0.8%の変化に相当する。また測定対象が高温、高濃度になるに従い、温度に対する屈折率変化は大きくなる。今後、精度の向上を期待するためには温度補正を考慮して実験を行う必要がある。

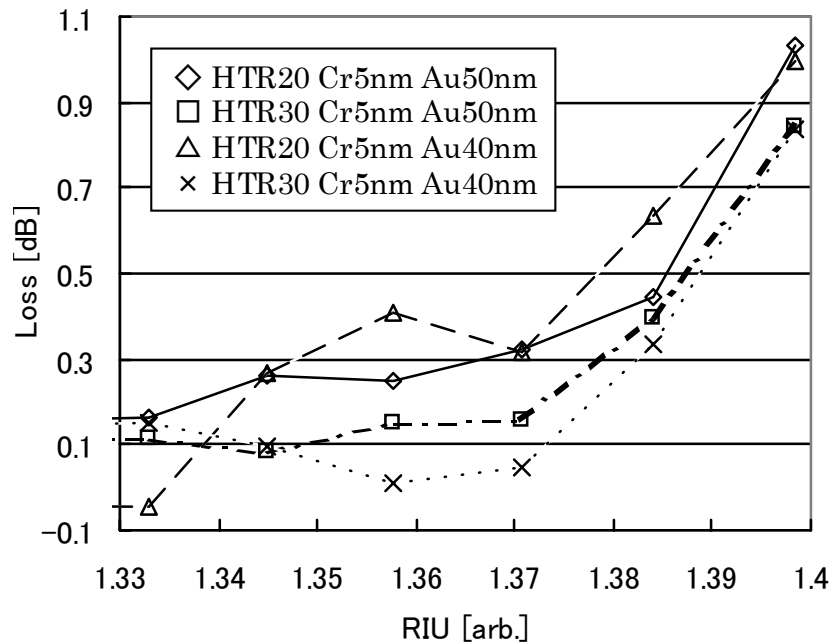



図 2.14.1　OTDR による測定結果

２．１４　OTDR による計測

OTDR（Optical Time Domain Reflecotmeter）は光ファイバに光パルスを入射し、ファイバ内のレーリ散乱に起因する後方散乱光と、接続点や破断点における反射光を検出することにより、光ファイバケーブルの障害点の探索・伝送損失などを測定することが可能な測定機器である。つまり、ファイバの他端を開放状態にしたまま、ファイバ中に連続的に分布する情報を 1 台の装置で観測することが出来る。このような装置をファイバセンサに利用することを考えると、1 本のファイバ中に複数点のセンサ部を設け、それらを 1 台の測定器で観測することができると考えられ、多点・離散分布型のセンサシステムへの応用が可能となる。

このようなセンサシステムを目的に、基本的な実験として 1 本のファイバに 1 ヵ所のセンサ部を設けて実験を行った。使用した OTDR は安藤電気株式会社製 AQ7250（波長 850nm）である。図 2.14.1 にセンサ部長さ 20・30mm と金膜厚 40・50nm（クロム : 5nm）からなる 4 つの組み合わせ条件で作製したファイバに対する実験結果を示す。グラフの縦軸には外界が空気である場合との差分を表している。膜厚 40nm と 50nm のグループで比較すると後者の方が屈折率と損失の間に比較的単調な関係が得られていることが分かる。一方で、同様の膜厚でセンサ長さを変化させた場合には、20mm の方が 30nm よりも損失が高い結果が得られている。この性質はセンサ部の伝送路への挿入損失に関係があると考えられ、今後検討すべき課題である。

損失の変化傾向に注目すると、低屈折率領域では変化が少ない、あるいはふらつくなど良好な感度が得られているとはいえないものの、高屈折率領域では総じて約 1dB の損失が得られている。このことから、現段階では油などの高屈折率な媒質のプラントからの漏洩検知といった使用に耐えうる性能であると考えられる。OTDR を用いたセンサシステムとしては、今後、センサの低屈折率での高感度化が課題であるといえる。

２．１５　まとめ

Ａ　物理検知センサ

以上より、ヘテロコア構造センサの物理検知センサでは、9－5－9 型ヘテロコアセンサを利用したとき、最大変位量 5mm として繰り返し再現性誤差が 0.1%である高精度なセンサができることが分かった。その時のヘテロコア挿入長は 1.8mm がほぼ最適値である。更に、1 次被膜を除去する必要があるヘテロコアセンサは、作成後に金によるコーティングをおこなえば、繰り返し再現性誤差に影響を与えることなく、破断の原因である空気との接触から免れることが分かった。これは、量産ベースでは分からないが、実験ベースでは 0.1%以下の再現性が認められ、そのヘテロコア構造センサ部分のコネクタを含んだ挿入損失は 0.5dB 程度である。

Ｂ　環境検知センサ

本コンソーシアムの成分計センサプロジェクトにおける創価大学の役割は、ヘテロコアファイバを SPR センサとして利用する際の、金属種類、膜厚といった基本的条件の模索であった。これら条件は一意に決定されるものではなく、想定するセンサシステムにより複数の条件が異なるものであった。具体的なセンサシステムとしては①単一波長光源と受光素子によるハンディタイプ、②OTDR による多点･離散型センサタイプの 2 種類である。

これら 2 種類の構成に対し、下地層としてクロム、センサ層として金の 2 層金属構成による条件だしを行ってきた。結果として、①の構成に対する条件としてはクロム 4.4nm、金 32.6nm が適度な金属膜厚であり、波長 850nm の光源を利用した場合には、屈折率 1.333～1.398 の屈折率範囲に対しセンサ精度 8×10^{-4}[RIU]以下を得られることが明らかとなった。この結果は、実際に利用されることの多いショ糖溶液濃度に換算すると、1%の濃度変化が検知可能な値であり、実用上十分な性能を持つと言える。一方で、②の構成では基本的な実験を行い、クロムと金の膜厚をそれぞれ 5nm・50nm とすれば、高屈折率の測定媒質の漏洩検知に利用することが可能であることが示された。

第３章　ひずみセンサモジュールの研究開発

３．１　はじめに

本章ではヘテロコア光ファイバセンサを用いてひずみセンサモジュールの試作と、その応用の水位計測システムについて報告する。

３．２　プロジェクト全体における本研究開発部分の位置づけ

ヘテロコア光ファイバはヘテロコア部において光の一部が周囲のクラッド層に漏れる。この漏れの度合いが光ファイバの適度な曲げに依存するので、ひずみを曲げに変換することにより機械的変位量を計測する。

本研究では創価大学からヘテロコア光ファイバセンサの技術指導をうけ、ヘテロコア光ファイバセンサの水位計応用を目的としたひずみセンサの開発、水位計測モジュールの研究試作、試験評価そして水位計測システムの設計を行う。

３．３　目的と目標

Ａ　目的

近年多数の計測点の遠隔モニタリングの方式として、光ファイバ網を利用する提案がなされている。光ファイバ網はそれを形成する光ファイバ線上の分布情報、または光ファイバ網上の多数の観測点からの多点情報を一括して広範囲に渡って遠隔監視することが可能である。しかしながらこれまでの光ファイバセンサによる機械的変位測定、一例としてFBG 方式（FBG：Fiber Bragg Grating）では、周囲の温度変動に対する温度補償が必要なため、システム全体の複雑化のみならずセンサモジュール構造も複雑になる。また、FBG自体が破断しやすいということと比較的に高価であるという問題がある。

この問題に対してヘテロコア構造の光ファイバセンサは光情報伝送システムで故障点検知に利用された OTDR システムを信号検出手段として用いて光ファイバ中の後方レイリー散乱光を測定するので、温度の影響を受けず、センサの構造もきわめてシンプルになり得る。この特徴を利用して従来の問題を解決したヘテロコア構造のひずみ計測モジュールを開発する。

Ｂ　目標

河川等の水位の計測原理は水位（水深）と水圧がほぼ正比例することから、水中にセンサを配置し水圧を計測することで水位を計測する方法が一般的である。この他に水面に対して垂直上方から超音波パルスを発し、水面からの反射応答時間から水位を計測する方法

もある。本研究のヘテロコア光ファイバセンサを用いた水位計では前者の水圧の変化を変位に変換して水位を計測する構成となる。

現状での圧力－変位変換機構を持つ電気式、光ファイバ式水位計について調査を行い、その結果を表3.3.1に示す。光ファイバ式水位計については参考カタログ等のものがあり、状況として電気式が市場のその大半を占めている。また圧力－変位変換機構においては電気式、光ファイバ式の両者においてもダイヤフラムが大半を示している。寸法においては電気式の方が小径である。これは光ファイバ式の場合に温度補償機構や曲げ誘起損失を回避するための光ファイバセンシング部の実装条件等によって寸法が大きくなっていると推測される。

一方、ヘテロコア構造は FBG 等が伸縮によって反射波長の変化でひずみを計測する原理に対して曲げ誘起による損失変化を計測原理としているので、他の光ファイバ式よりも小型にできるという利点を持っている。

表 3.3.1　水位計の検出方式と諸元

検出方式		圧力－変位 変換機構	外形寸法
電気式 水位計	シリコン振動子	ダイヤフラム	ϕ60×300mm
	ピエゾ抵抗素子	ダイヤフラム	ϕ38×237mm
	水晶振動子	ベローズ	ϕ65×300mm
	水晶振動子	ダイヤフラム	ϕ60.5×240mm
	差動トランス	ベローズ	ϕ60×343mm
光ファイバー式 水位計	FBG	ダイヤフラム ＋ブルドン管	ϕ120×380mm
	FBG	ダイヤフラム	ϕ114×203mm
	反射干渉型 （マッハ・ツェンダー）	ダイヤフラム	ϕ120×682mm

本研究ではヘテロコアセンサの特徴を生かしϕ60mm 程度のひずみ計として実用化できるひずみ計モジュールを試作し、これを応用した水位計測システムの基本設計を行う。

水位計測システムの目標仕様は下記のとおりである。

（1）測定対象：河川等の水位
（2）測定範囲：最大水位 10m、測定精度±10mm
（3）標準測定点数：10～20／システム
（4）ネットワーク長：1km 以内
（5）計測所要時間：20 秒／1 測定点

３．４　水位計向け高感度型ヘテロコアセンサの研究開発

ヘテロコアセンサを水位計に応用するために、センサの基本特性を調査し水位計モジュール作製のための諸条件を決定する。また、より高精度な計測を行うために、ファイバ構成の工夫やOTDRの測定条件の検討を行い測定精度の向上を目指す。この作業フローを図3.4.1に示す。

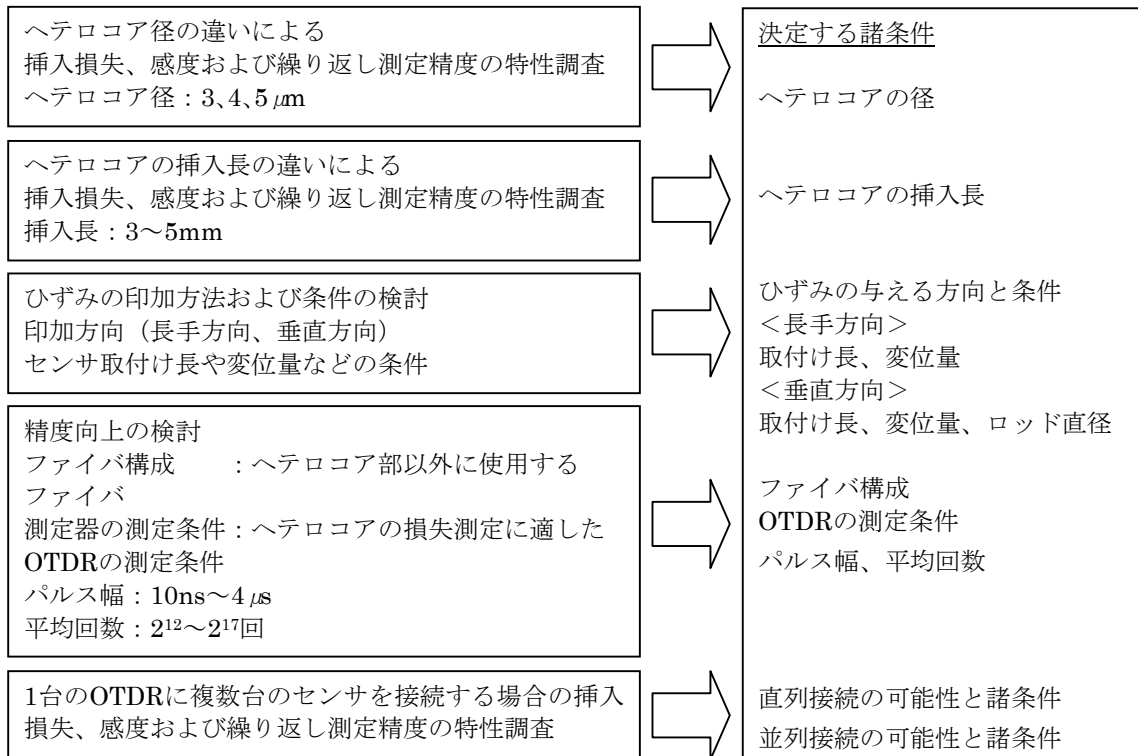



図3.4.1　水位計向け高感度型ヘテロコアセンサの検討

Ａ　ヘテロコア径の検討

（１）9-5-9型ヘテロコアセンサの研究

水位計向け高感度型ヘテロコアセンサの研究開発にあたり、まず創価大学が開発したヘテロコアセンサの技術導入のため、ヘテロコアセンサの試作および試作センサの特性評価を行った。試作にあたっては創価大学の研究成果を元にコア径などセンサ諸元の決定、製作方法の条件設定などを行った。図 3.4.2 にひずみに対する損失変化の特性を、図 3.4.3 に結線図を、図3.4.4に実験装置の構成を、図3.4.5に実験装置の写真を示す。図3.4.2から、挿入損失および変位量0〜12mm程度での損失変化は創価大学の研究結果とほぼ同等

の結果が得られた。また、ひずみに対する損失変化に周期的ゆらぎが見られるが、これはその後の研究で創価大学が報告している「図 2.4.5 挿入長の違いによるステージ移動距離と損失の関係」(2.4.C 挿入長 参照) と同様の動きであり、実験装置やひずみの加ええ方は異なるが基本的な動作を再現できたと言える。なお、図 3.4.2 のデータはヘテロコア径 5 μm のセンサのもので、以降ヘテロコア径 3μm のヘテロコアセンサを 9-3-9 型、4 μm のものを 9-4-9 型、5μm のものを 9-5-9 型と表す。

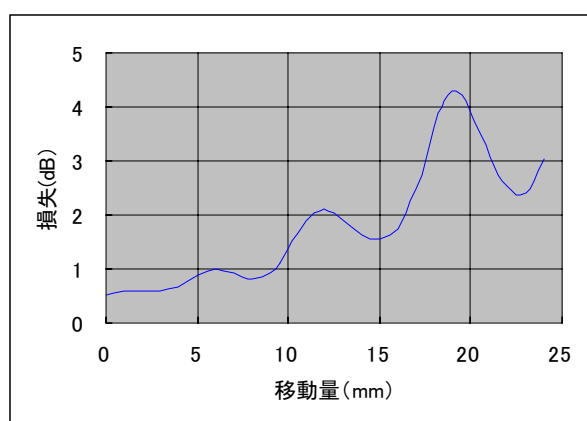



図 3.4.2　ひずみに対する損失変化の特性

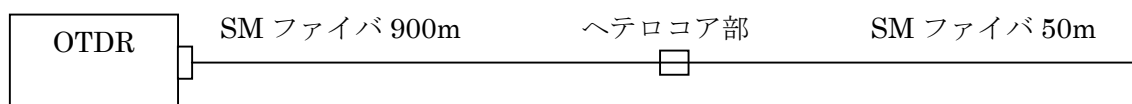



図 3.4.3　結線図

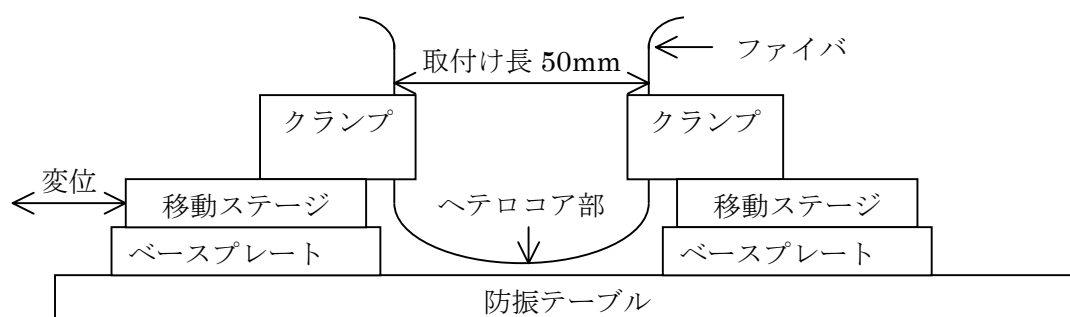



図 3.4.4　実験装置の構成

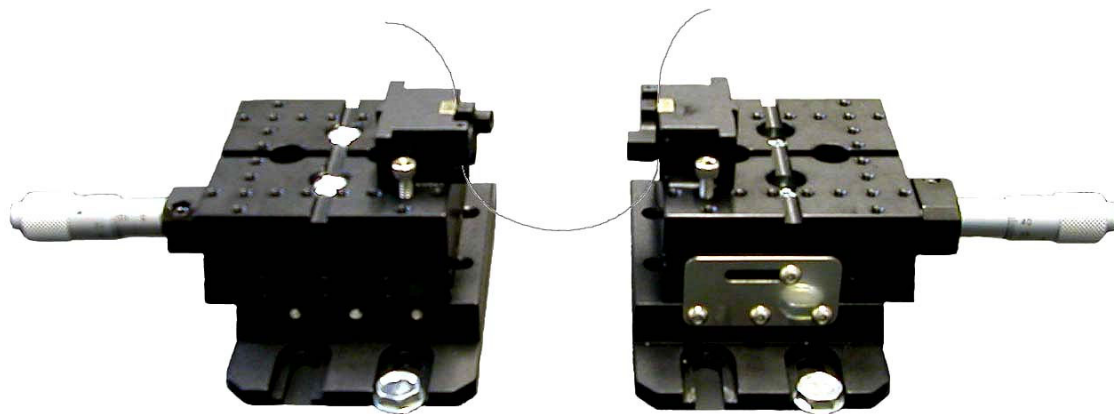



図 3.4.5　実験装置の写真

（２）9-3-9 型ヘテロコアセンサの研究

創価大学では、9-5-9 型ヘテロコアセンサを使用した比較的大きな変位量に対するひずみ計測を行うための最適条件を引き続き研究を行い、横河電子機器は水位計への応用として高感度型である 9-3-9 型ヘテロコアセンサの研究に取り組んだ。

図 3.4.6 に 9-3-9 型のひずみに対する損失変化の特性を、図 3.4.7 に挿入長に対する損失変化量および挿入損失の特性を、図 3.4.8 に挿入長に対する繰り返し測定精度の特性を、図 3.4.9 に結線図を、図 3.4.10 に実験装置の構成を、図 3.4.11 に実験方法を、図 3.4.12 および図 3.4.13 に実験装置の写真を示す。5mm 以外での挿入損失が大きかったので、5mm 近傍について繰り返し測定精度の計測を行った。

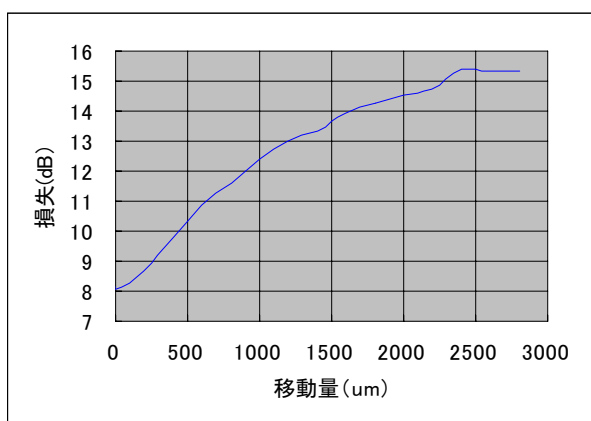



図 3.4.6　ひずみに対する損失変化の特性

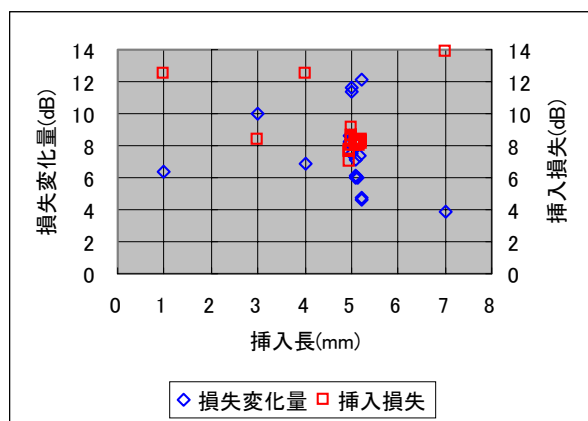



図 3.4.7　挿入長に対する損失変化量と挿入損失

図 3.4.8　挿入長に対する繰り返し測定精度

OTDR　SM ファイバ 50m　ヘテロコア部　DSM ファイバ 850m

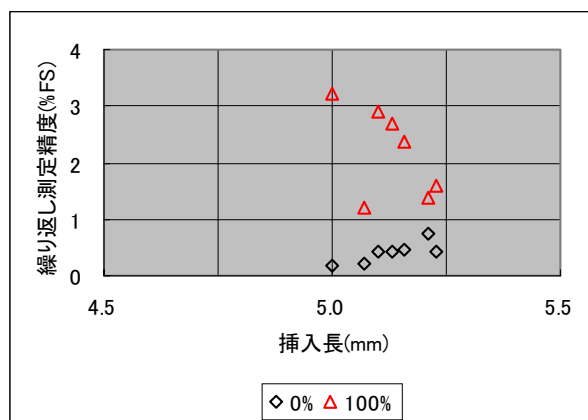
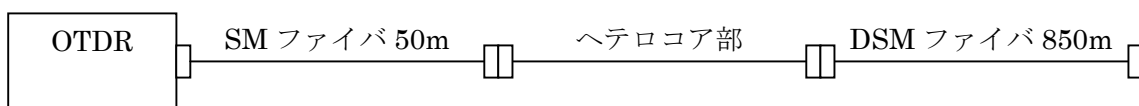



図 3.4.9　結線図

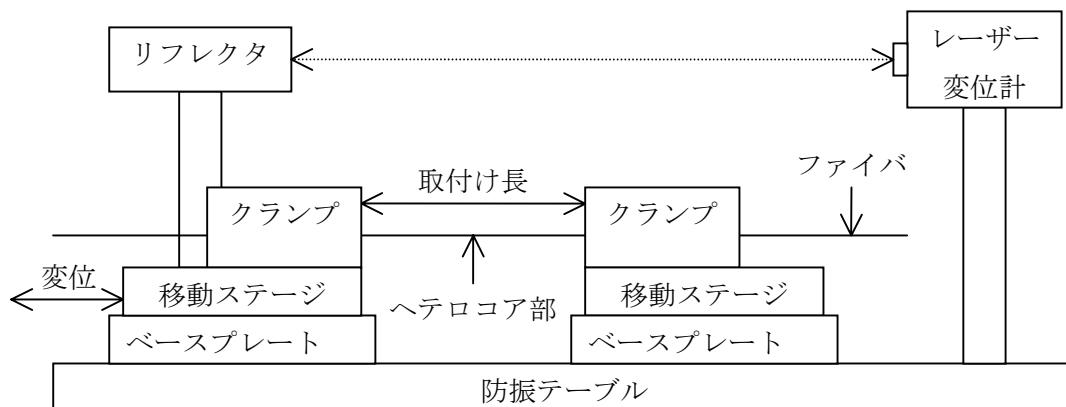



図 3.4.10　実験装置の構成

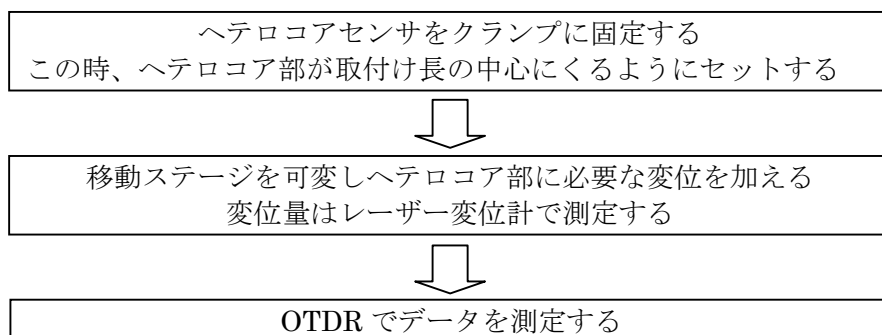



図 3.4.11　実験方法

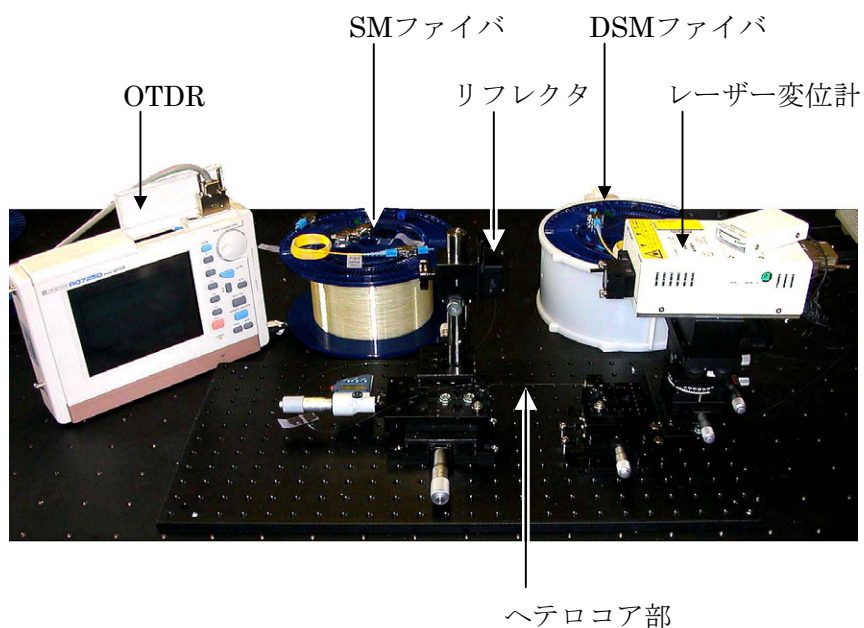



図 3.4.12　実験装置の写真

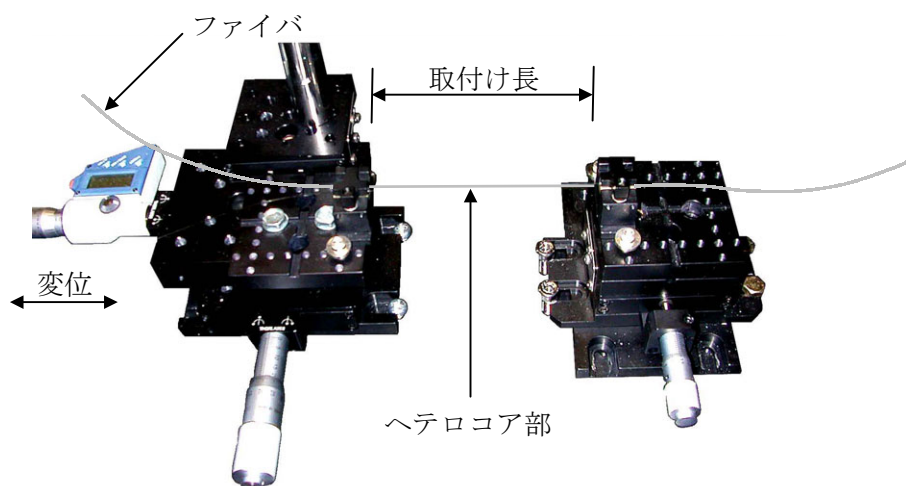



図 3.4.13　実験装置の写真

図 3.4.6 から 9-3-9 型の感度（ひずみに対する損失変化量）が 9-5-9 型（図 3.4.2 参照）に比べて高いことがわかる。また、図 3.4.7 および図 3.4.8 からヘテロコアの挿入長による違いはあるが、損失変化量は約 4～12dB、繰り返し測定精度は約 1～3%　FS である。

9-3-9 型の特長として高感度であることが上げられるが、反面繰り返し測定精度が約 1～3%となり水位計（要求精度 0.1%　FS）への応用は難しいと考えられる。なお、繰り返し測定精度とはヘテロコアセンサにひずみを与えない状態を 0%、周期的ゆらぎが発生しない範囲で最大のひずみを与えた状態を 100%として、0%の状態→50%曲げの状態→100%の状態→50%戻しの状態→0%の状態を 5 回繰り返して測定し、それぞれの状態での

標準偏差（1σ）を求め、それをフルスケール（100%の状態での損失値－0%の状態での損失値）に対する百分率で表した値である。

（3）9-4-9 型ヘテロコアセンサの研究

これまでの創価大学で研究をすすめてきた 9-3-9 型、9-5-9 型ヘテロコアセンサでは、本研究の目的である高精度水位計測への適用が困難と判断されたので、大学との検討会を持ち更に最適なヘテロコア構造を探索することとし、新たに異なるコア径 4 μm について研究を行った。試験方法は前項の 9-3-9 型ヘテロコアセンサと同様の方法で行い 9-3-9 型、9-5-9 型と比較すると挿入損失が 9-3-9 型よりも小さく、損失変化量が 9-5-9 型よりも大きく水位計応用としてより適した特性が得られたので更に詳細について研究を行った。試験の詳細データについては 3.4.B 項以降で説明する。

（4）ヘテロコア径の選定

これまでの結果からヘテロコア径の違いによってひずみに対する損失特性や繰り返し測定精度が異なることを実験的に確認した。その特性の違いをまとめると OTDR 計測における損失変化量を図 3.4.14(a)に、OTDR 計測における繰り返し測定精度を図 3.4.14(b)に示すような結果となった。図 3.4.14 において取付け長と変位量（損失が周期的な変化が発生しない範囲）はヘテロコア径 3 μm が 230mm（取付け長）、1.5mm（変位）、4 μm が 230mm（取付け長）、2mm（変位）、そして 5 μm が 35mm（取付け長）、5mm（変位）であった。傾向としてヘテロコア径が小さくなると損失変化量が大きくなり感度が高くなる一方で、繰り返し測定精度はヘテロコア径が小さくなると悪くなる傾向があることを確認した。このような傾向を持つことから水位計の要求仕様（精度 0.1%）、OTDR の特性、ヘテロコアセンサの繰り返し測定精度（1σ）を考慮すると、ヘテロコア径は 4 μm が最も適していると判断する。そこで OTDR 計測におけるヘテロコア径選定のフローについてまとめると図 3.4.15 のようになる。

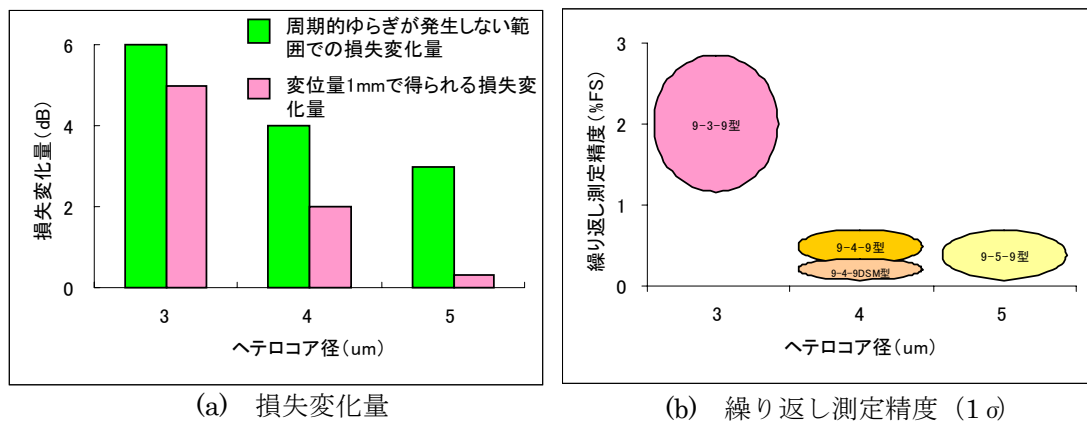
(a)　損失変化量

(b)　繰り返し測定精度（1σ）

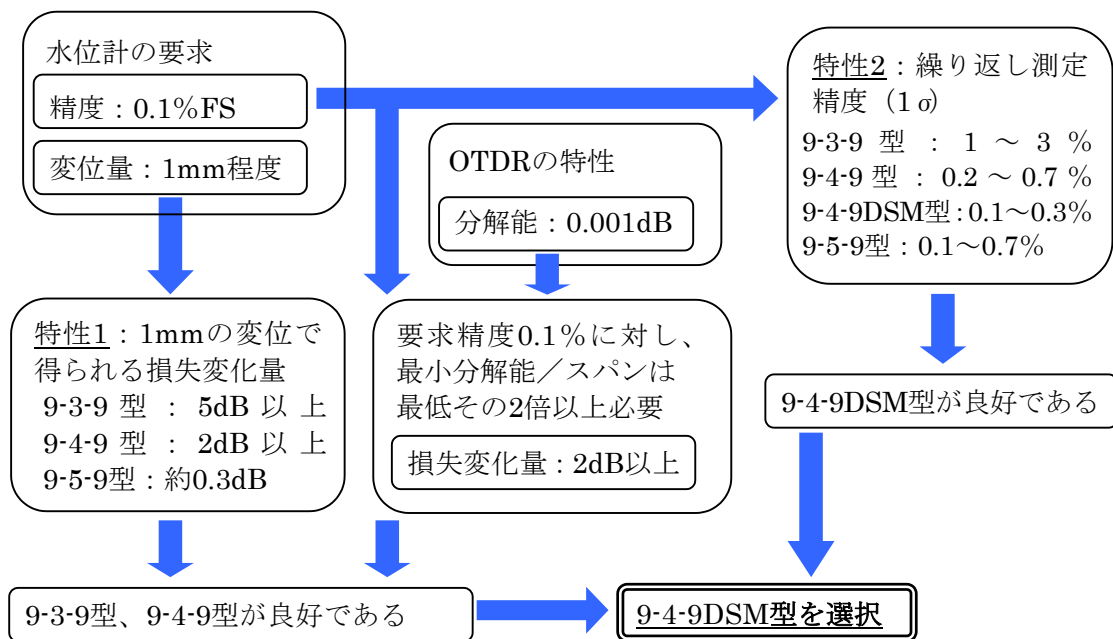
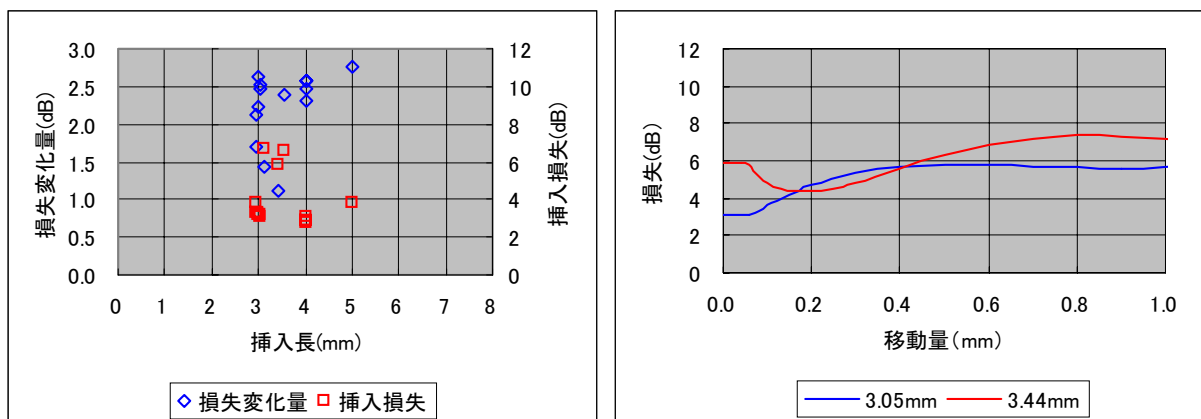
図3.4.14　OTDR計測におけるヘテロコアセンサの特性

9-4-9DSM型：ヘテロコア後方のダミーファイバにDSMを使用した場合。
詳細は、3.4 D ファイバ構成の工夫による繰り返し測定精度向上を参照。

図 3.4.15　OTDR 計測におけるヘテロコア径の選定フロー

B　ヘテロコアの挿入長検討

挿入長の違いによる損失変化量、挿入損失および繰り返し測定精度を測定し比較する。結線、実験装置および実験方法は 3.4.A.(1)と同様である（図 3.4.11 参照)。

挿入長は 3～5mm について測定し、その結果を図 3.4.16 (a)に示す。損失変化量については有意な違いは見られなかったが、挿入損失において 3.5mm 近傍で挿入損失が 6dB という他の挿入長と比較すると大きい損失となっている。図 3.4.16 (b)に挿入長 3.05、3.44mm の変位に対する損失の特性を示す。

(a)　損失変化量と挿入損失

(b)　変位量に対する損失

図 3.4.16　変位に対するビームプロファイル

このグラフから挿入長 3.05mm では変位に対して指数関数的に損失が増加しているが、挿入長 3.44mm では変位に対して周期的な損失の変化がみられる。これは 9-5-9 型の挿入長 5mm の時の挙動と類似している。考えられる要因としてヘテロコア部を伝搬する光のモードが遷移し、それが挿入長に関係していると考えられる（2.4 C 項参照）。

そこで、ビームアナライザを用いて挿入長 3.44mm および 3.05mm のヘテロコアセンサへの変位に対するビームプロファイルを観察した。この結果を図 3.4.17 に示す。同図から挿入長によって損失変化の挙動とモードが関係していることが確認できた。

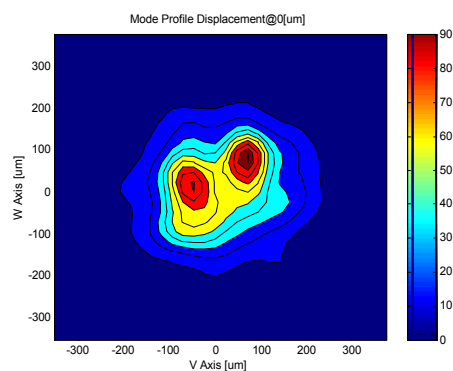
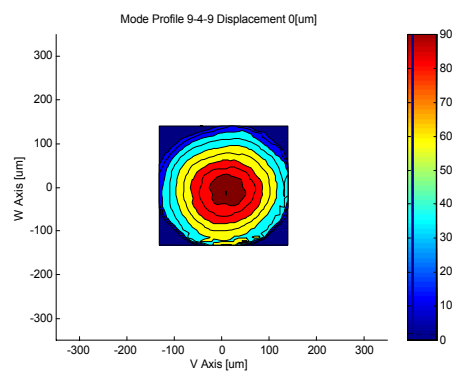
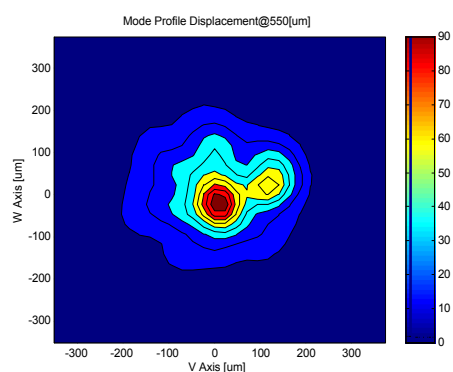
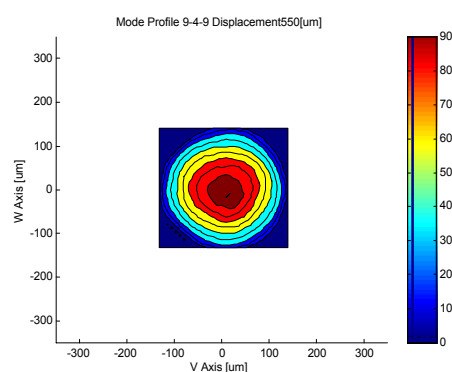
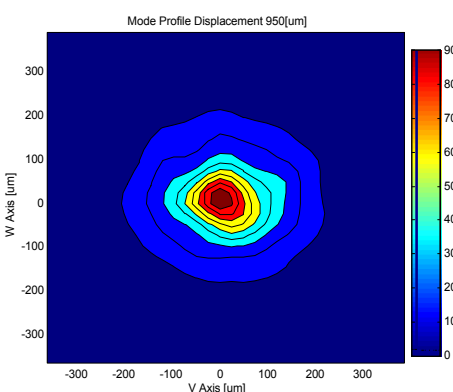
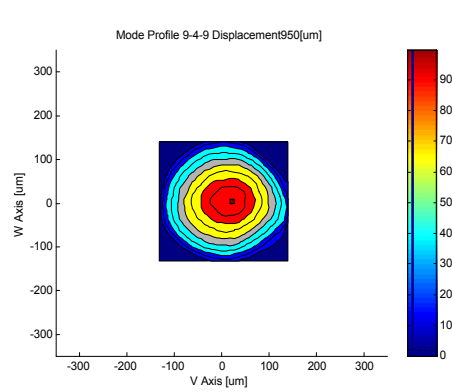



図 3.4.17　変位に対するビームプロファイル

図 3.4.18 に 9-4-9 型での挿入長に対する繰り返し測定精度 1σを示す。3.5mm 以外には大きな違いは見られなかった。3.5mm において繰り返し測定精度が異なる挙動を示したのは前述のとおりモード遷移による損失の周期的な変化が原因と考えられる。ひずみ計測において変位に対して損失が周期的な変化が起こるのは好ましくない。しかし、0.5mm の精度で挿入長を製作するのは通常の融着作業において十分実現可能であり、挿入長を設定して製作することにより挿入長 3.5mm で起こるような現象を回避することは可能と考えられる。

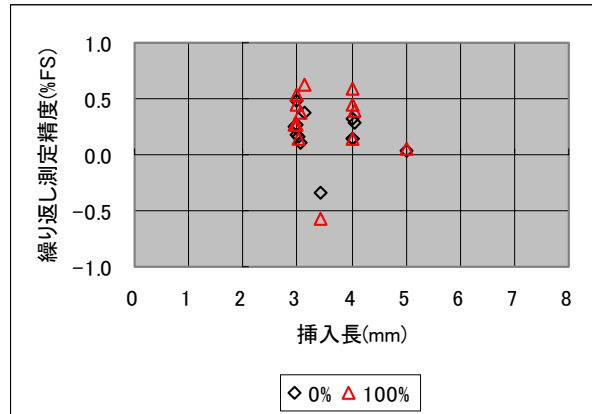



図 3.4.18　OTDR 計測における挿入長に対する繰り返し測定精度 1σ（9-4-9 型）

C　ひずみを加える方法と取付け条件の検討

これまでヘテロコアセンサにひずみを加える方法として長手方向に変位を与えて曲げひずみを加えてきたが、この方法の他に垂直方向へ押す（ヘテロコア部を直接押す）方法についても検討し、具体的な水位計モジュールへ展開するのに必要な条件を検討する。なお、ヘテロコアセンサへひずみを印加する方向として、ひずみが大きくなる方向を「行き」、ひずみが小さくなる方向を「帰り」と示す。

（1）長手方向の取付け条件の検討

長手方向の曲げ戻しに対して、ヘテロコア部の取付け長は水位計モジュールのサイズから最大 250mm 程度に制限される。50,80,230mm に変えた時の繰り返し測定精度と挿入損失、損失変化量を測定し比較する。結線、実験装置および実験方法は「A　ヘテロコア径の検討」と同様である。図 3.4.19 に取付け長に対する損失変化量の特性、図 3.4.20 に取付け長に対する繰り返し測定精度を示す。

図 3.4.20 から、取付け長 50mm は繰り返し測定精度が悪く、80mm と 230mm ではあまり差がないことがわかる。これは実験装置の影響（移動ステージの温度変化や変位計の誤差）と考えられ、実際に水位計モジュールを製作する場合も取付け長が短いとその機構部分の影響が現れやすくなると考えられる。また、80mm 以上では取付け長を伸ばしても繰り返し測定精度向上への効果があまりないことがわかる。図 3.4.19 から、取付け長の変化による挿入損失と損失変化量への影響は少ないと判断でき、これらの結果からヘテロコア部の取付け長は 100mm 程度とし変位量は 150μm 程度とする。

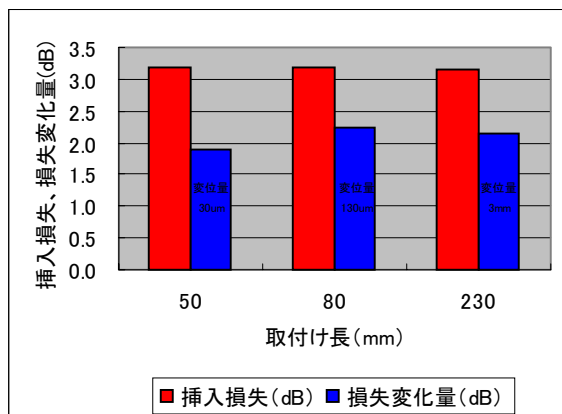



図 3.4.19　取付け長に対する
挿入損失および損失変化量

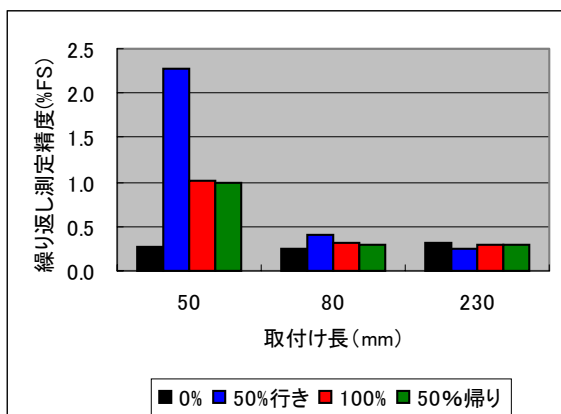



図 3.4.20　取付け長に対する
繰り返し測定精度（1σ）

（2）垂直方向の取付け条件の検討

垂直方向へのひずみ（ヘテロコア部を直接押す）に対する基本特性を調査し諸条件を決定する。この作業フローを図 3.4.21 に、また結線図と実験装置の構成を図 3.4.22 に、実験装置の写真を図 3.4.23 に示す

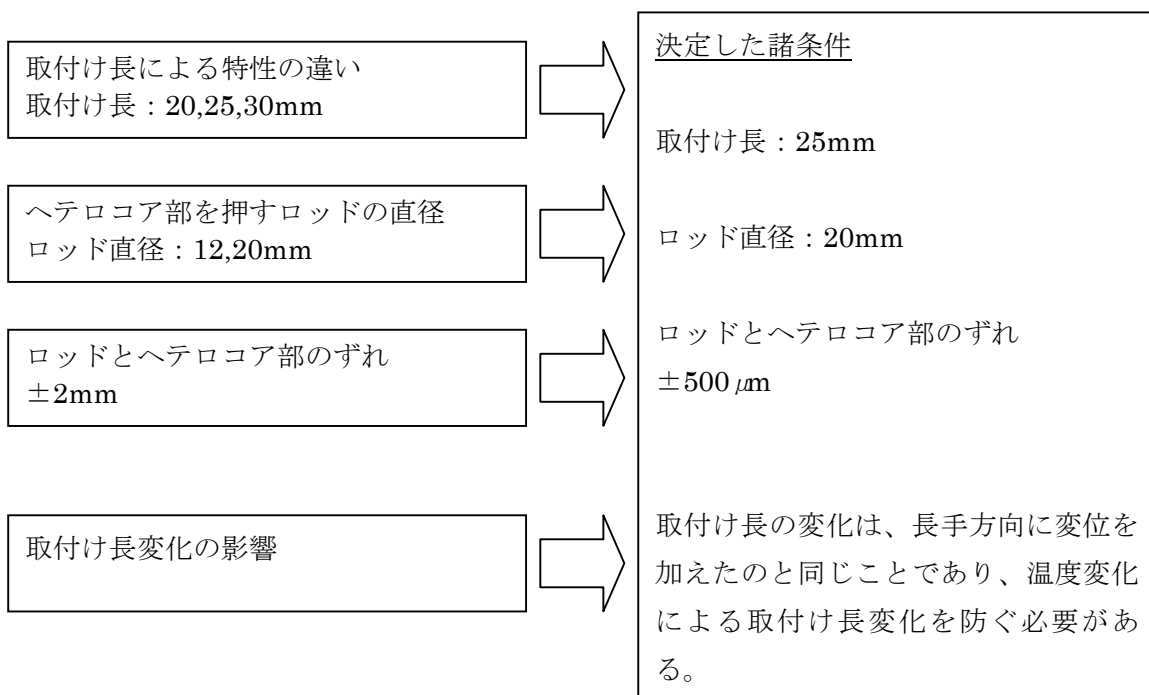



図 3.4.21　垂直方向のひずみに対する特性調査の作業フロー

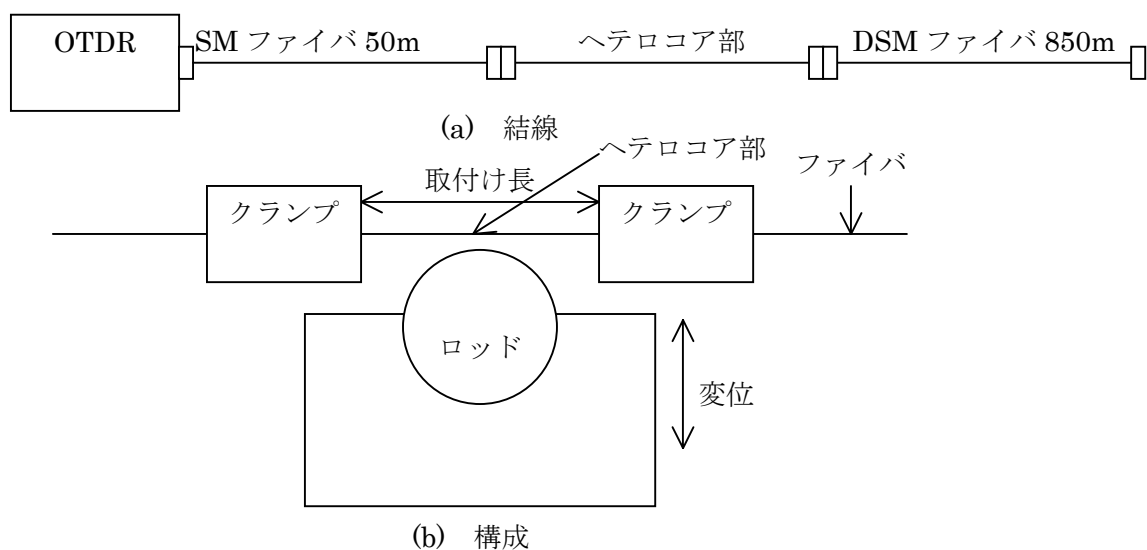



図 3.4.22　結線図と実験装置の構成

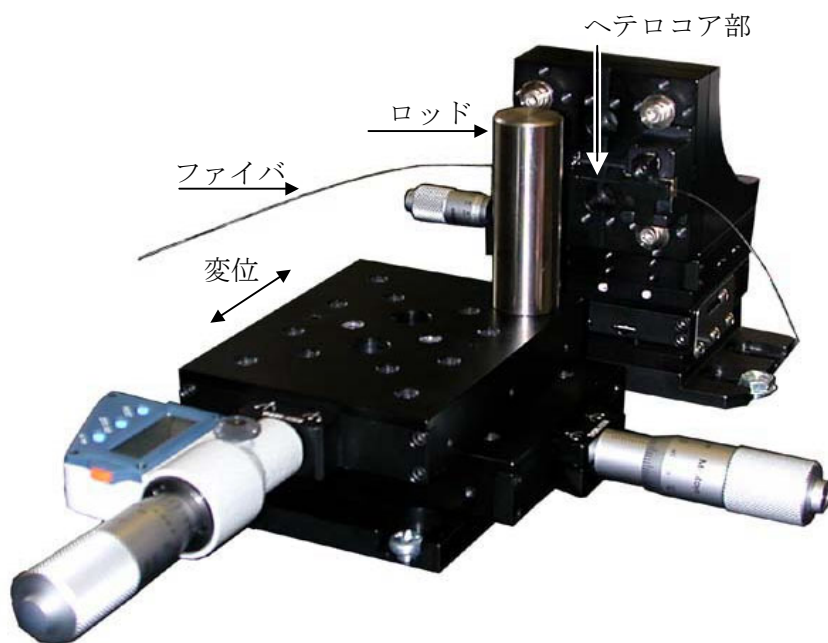



図 3.4.23　実験装置の写真

① 取付け長による特性の違い

取付け長はヘテロコア部以外の伝送路での曲げ誘起損失を考慮し、水位計モジュールのサイズから最大 30mm に制限される。図 3.4.24 に垂直方向の曲げに対する損失の取付け長による特性変化を、図 3.4.25 に取付け長に対する繰り返し測定精度 1 σを示す。図 3.4.24 から、取付け長 20mm と 25mm では特性に大きな差がなく、また 30mm に比べて感度が高いことがわかる。図 3.4.25 から、大きな違いではないが取付け長が短くなると繰り返し測定精度が悪くなる傾向が見られる。これらの結果から取付け長は 25mm とする。

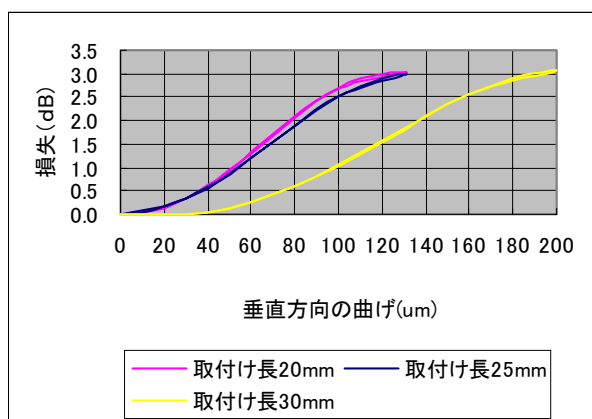



図 3.4.24　垂直方向の曲げに対する損失

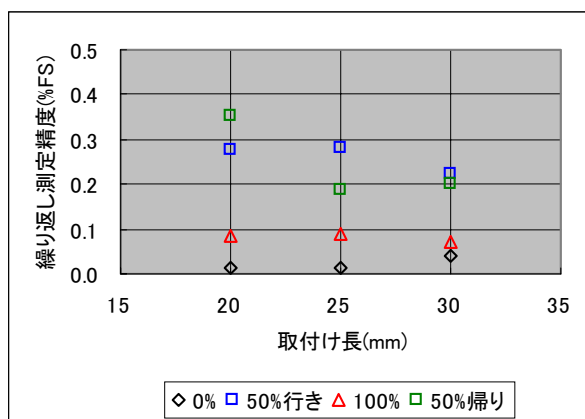



図 3.4.25　取付け長に対する
繰り返し測定精度 1σ

②　ロッドの直径およびロッドとヘテロコア部のずれ

ヘテロコア部を押すロッド径については、水位計モジュールとして現実的なサイズで、かつ実験装置（移動ステージ）に装着可能なロッドを 2 種類（直径 12,20mm）準備した。図 3.4.26 にロッド直径に対する繰り返し測定精度 1 σを、図 3.4.27 にロッド直径毎の垂直方向の曲げに対する損失を、図 3.4.28 にロッド直径毎のロッドとヘテロコア部のずれに対する損失変化を示す。

図 3.4.26 から、直径 20mm の方が 12mm に比べて再現性が良く、また図 3.4.27 から感度が高いことがわかる。図 3.4.28 は、ロッドとヘテロコア部がずれた場合の影響を調べた結果で、ヘテロコアセンサの垂直方向に 100%近い曲げを加えた状態でロッドを長手方向にずらした時の損失変化を測定する。結果としてロッド直径 12mm と 20mm では大きな違いは見られなかった。これらの結果からロッド直径の影響は少なく、変位量は約 120 μm が良いと判断できる。また、ロッドとヘテロコア部のずれは約±500 μm は許容される。

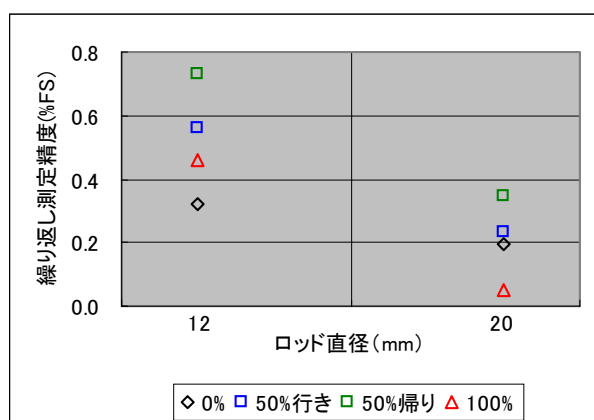



図 3.4.26　ロッド直径に対する
繰り返し測定精度 1σ

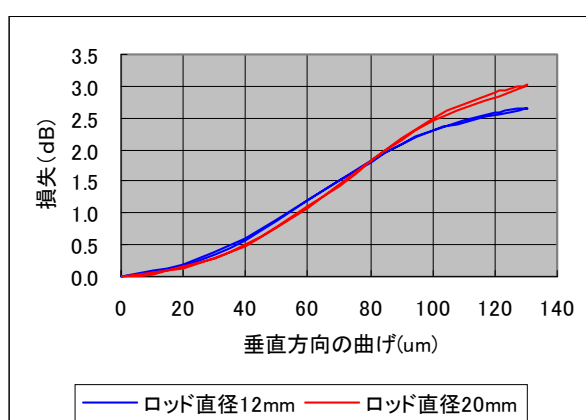



図 3.4.27　曲げに対する損失

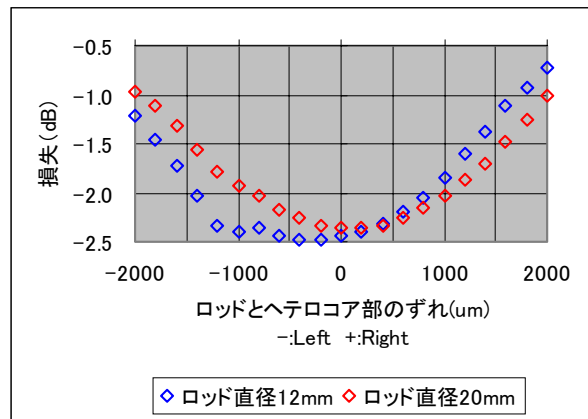



図 3.4.28　ロッドとヘテロコア部の
ずれに対する損失変化

③　取付け長変化の影響

水位計モジュールとして製作した場合、温度変化の影響で取付け長の変化が予測され、この影響を調査した。図 3.4.29 に取付け長変化に対する損失の変化を示す。取付け長の変化は、長手方向に変位を加えたのと同じことであり、取付け長が 2 μm 変化しただけで、0.56%FS の損失変化がおこっていることがわかる。水位計モジュール製作時には温度変化による取付け長の変化を防ぐ必要がある。

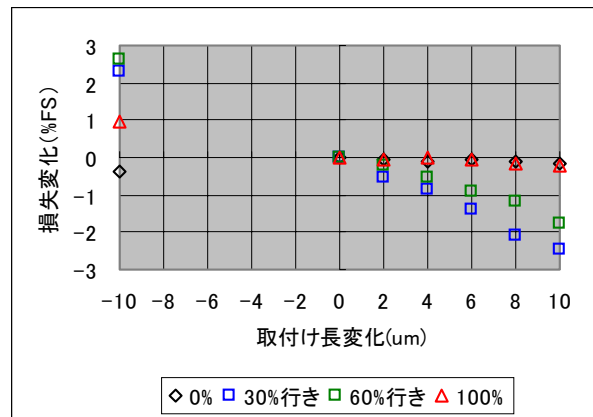



図 3.4.29　取付け長変化に対する損失変化

D　ファイバ構成の工夫による再現性向上の検討

これまでヘテロコアに用いるファイバについてコア径、挿入長等について検討を行ったが、ヘテロコアセンサを構成する伝送路用ファイバについて検討を行う。

伝送路用ファイバとしてこれまでは波長 1.3 μm 用の SM ファイバを用いてきたが、SM ファイバよりも低損失な DSM（分散シフト）ファイバと組み合わせた場合の挿入損失がどのようになるか試験を行った。試験構成を図 3.4.30 に、試験結果を表 3.4.1 に示す。この結果からヘテロコア部の前方に SM ファイバを、後方に DSM（分散シフト）ファイバを挿入することにより挿入損失を低減することができる。挿入損失の低減は、OTDR 計測において SN 比を改善し繰り返し測定精度の向上につながる。また複数台の直列接続においても、同様に繰り返し測定精度の向上につながるものと考えられる。

表 3.4.1　ファイバの構成による挿入損失の変化

ファイバ種類		挿入損失 dB
ファイバA	ファイバB	
SM	SM	4.6
SM	DSM	3.0
DSM	SM	7.6
DSM	DSM	6.2

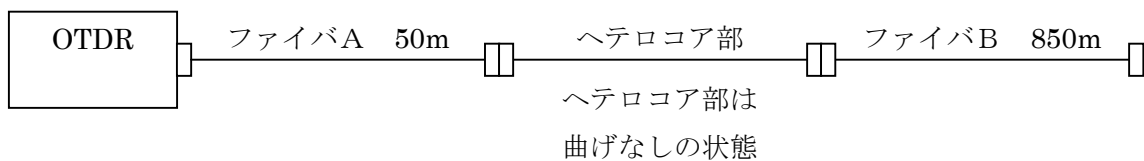



図 3.4.30　結線図

E　複数台の直列接続について

1 台の OTDR に 2 台のヘテロコアセンサを直列に接続した場合の特性を調査する。図 3.4.31 に示す試験構成で 1 台目（OTDR に近い方）のセンサをセンサ A、2 台目のセンサをセンサ B とすると、センサ A はセンサ B の有無に対して影響を受けない。一方、センサ B はセンサ A の有無およびその状態（損失変化）により大きく影響を受けることがわかった。

センサ A の状態（損失）を変化させ、センサ B の感度を測定した（図 3.4.32 参照)。センサ B はセンサ A の損失の増加とともに感度が小さくなり、結果として繰り返し測定精度が劣化した（図 3.4.33 参照)。

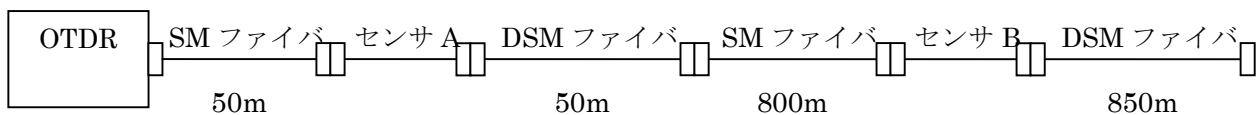



図 3.4.31　結線図

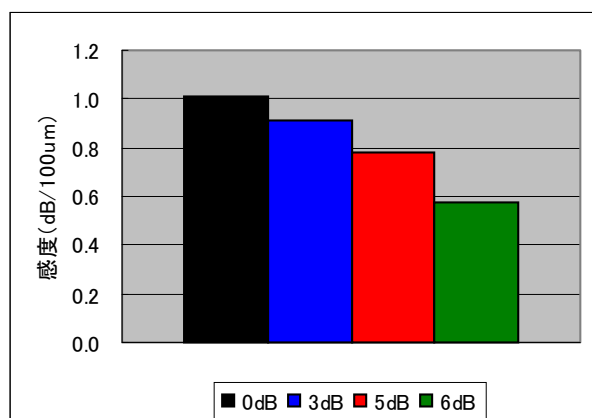



図 3.4.32　センサ A の損失
に対するセンサ B の感度

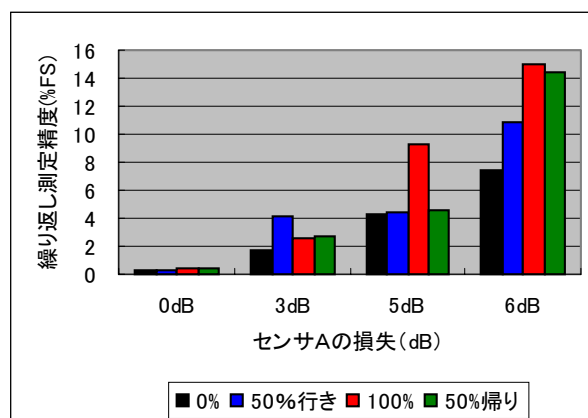



図 3.4.33　センサ A の損失に対する
センサ B の繰り返し測定精度 1σ

（1）複数台の直列接続の影響について

図 3.4.32、33 からセンサ B はセンサ A の有無およびその状態（損失変化）により大きく影響を受けることがわかった。しかし、この変化がセンサの特性変化なのか測定器（OTDR）の性能によるものなのか判断ができない。そこで、OTDR に比べてダイナミックレンジの広い光マルチメータを用いて同様の調査を行う。試験に使用した光マルチメータの諸元は表 3.4.2 のとおりである。

表 3.4.2　光マルチメータの諸元

型　名	仕　様
フレーム：8153A（アジレント）	
光源部：81554SM	光源：半導体レーザ 波長：1310、1550nm（切り替え）
受光部：81533B+81524A	受光強度：3dBm～-100dBm 波長：800～1650nm

前項の OTDR の計測方法と同様の方法で試験を行った。試験構成の結線図を図 3.4.34 に、実験時の写真を図 3.4.35 に示す。なおセンサ A の損失は、光源および光パワーメータを外して OTDR で測定した。光マルチメータによる計測でのセンサ A の状態（損失）を変化させ、センサ B の感度は OTDR で計測した場合よりも変化が小さかった（図 3.4.36 参照）。

この結果から繰り返し測定精度を求めると図3.4.37のようになりセンサAの損失が3dBでもセンサ B は影響を受けていないことがわかる。損失 5dB、6dB においても繰り返し測定精度は約 2%以内で、OTDR で計測した結果（図 3.4.33 参照）と比べるとその差は明らかであり、複数台接続において繰り返し測定精度が悪くなる原因は OTDR のダイナミック

レンジの制限を受け測定精度が劣化したと考えられる。このため複数台接続においては OTDR のダイナミックレンジの拡大が必要となる。

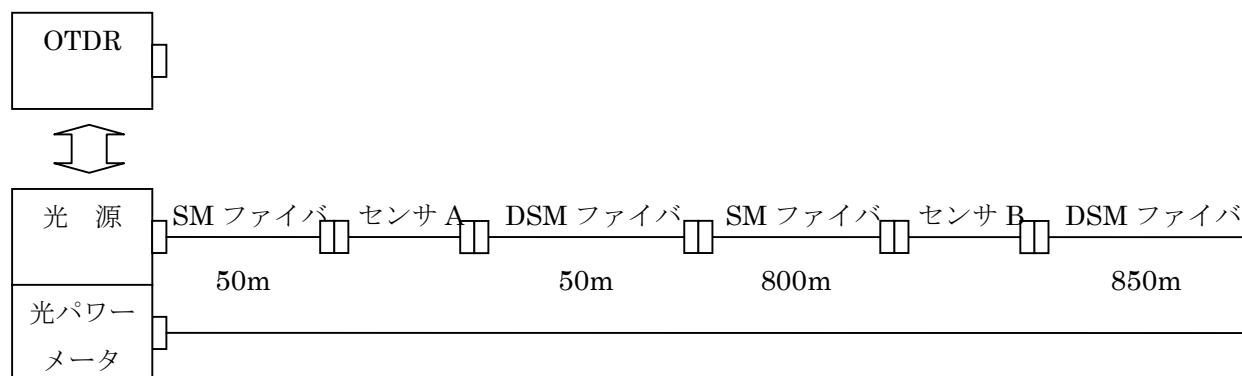



図 3.4.34　結線図

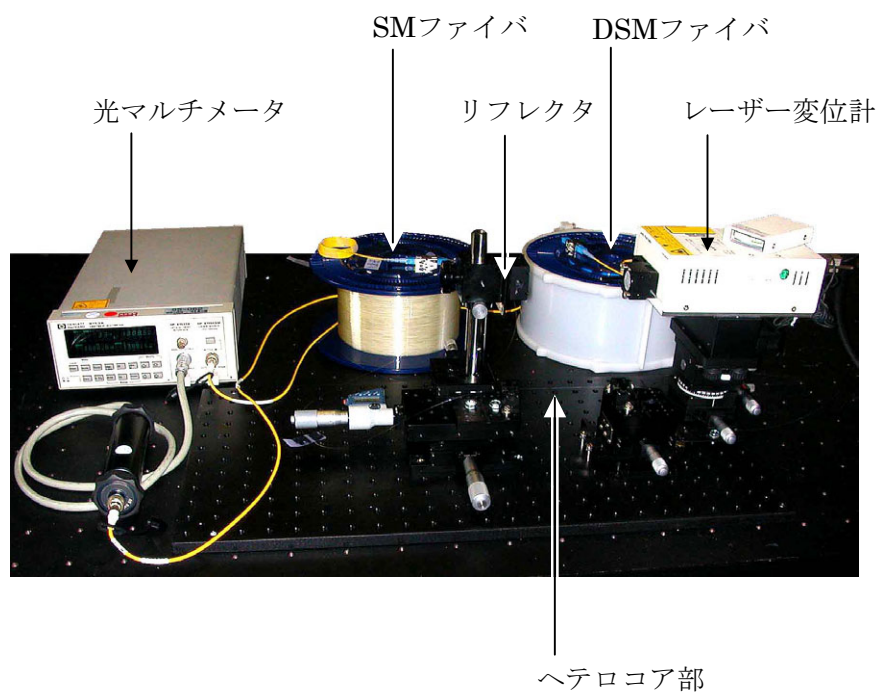



図 3.4.35　実験装置の写真

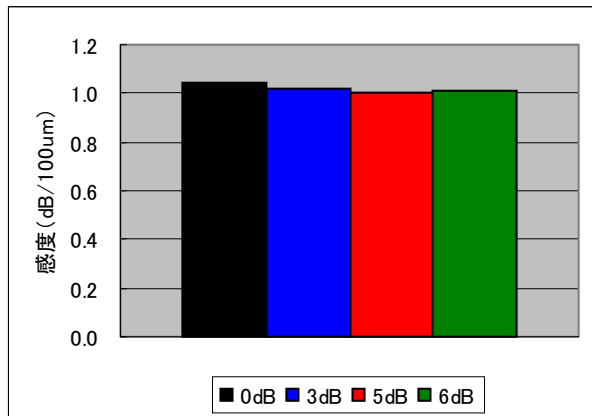



図 3.4.36　センサ A の損失に対する
センサ B の感度（パワー計測）

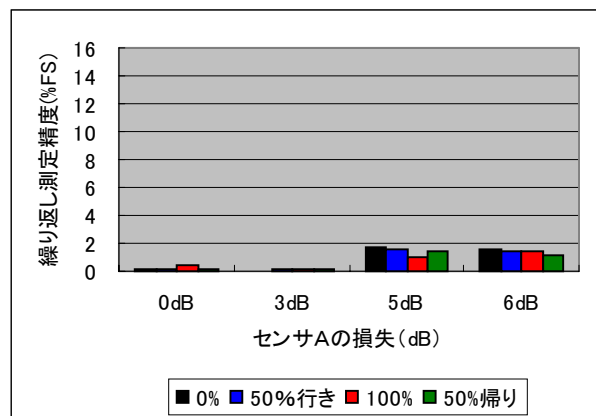



図 3.4.37　センサ A の損失に対するセンサ B の
繰り返し測定精度 1σ（パワー計測）

（2）接続損失について

ヘテロコアセンサの損失計測において実際には挿入損失＋損失変化量を計測している。

損失変化量はセンサの感度や精度の重要な要因となるが挿入損失は極力小さいことが望まれる。ヘテロコアセンサの製作は 2 章でも記述されているように融着接続器によって行われる。そこで、融着接続器における損失推定の方法[1]に基づいて異なるコア径のファイバの接続で最も大きな要因となる MFD（Mode Field Diametor）ミスマッチによる接続推定損失を求めてみた。MFD ミスマッチによる損失は式 3.4.1 のとおりである(1)。

$$Loss = -10 \times Log\left[\left\{\frac{2w_1w_2}{\left(w_1^2 + w_2^2\right)}\right\}^2\right] \qquad \text{式 3.4.1}$$

ここで、w_1, w_2は伝送用ファイバおよびヘテロコア部のファイバの $\frac{\mathrm{MFD}}{2}$ である。w_1, w_2についてヘテロコアセンサを構成するファイバの OTDR での測定波長 1.3 μm におけるビームプロファイルをビームアナライザで観測し w_1, w_2の推測値を求めた。伝送用に用いたファイバが 1.3 μm の波長帯のファイバであることと、NA（開口数）値がヘテロコア用と伝送用でどちらもほぼ同じ値であることからファーフィールドにおけるビームの広がり角が同じくなると考えた。このことからビームプロファイルから MFD 径の推定値の算出方法は、カタログ値の MFD 径とビームアナライザで計測したファーフィールドのビーム径の比を求め、同様にして計測したヘテロコア用ファイバのビームプロファイル径をその比率で割り推定の MFD 径を算出した。

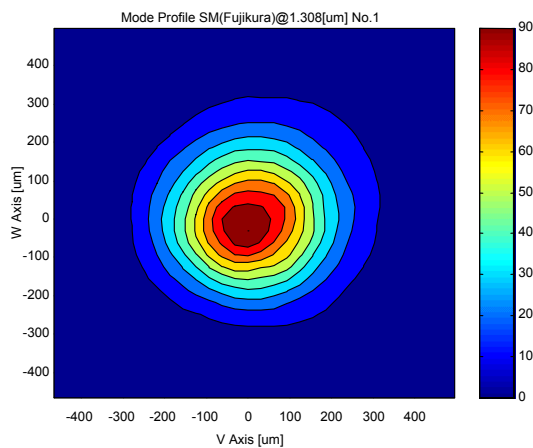
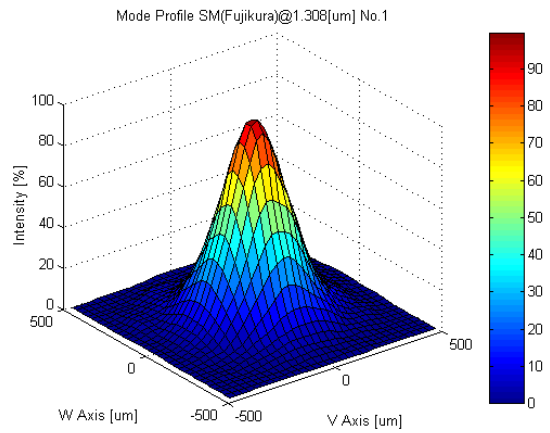
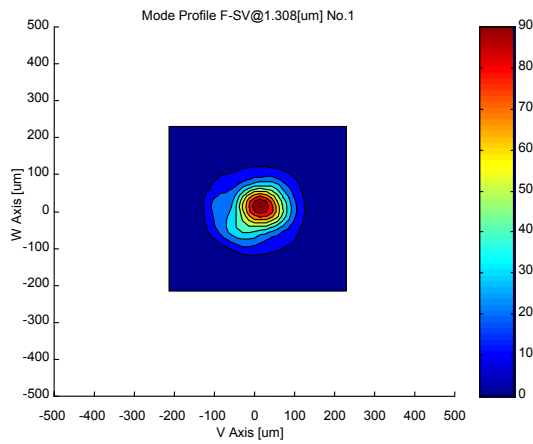
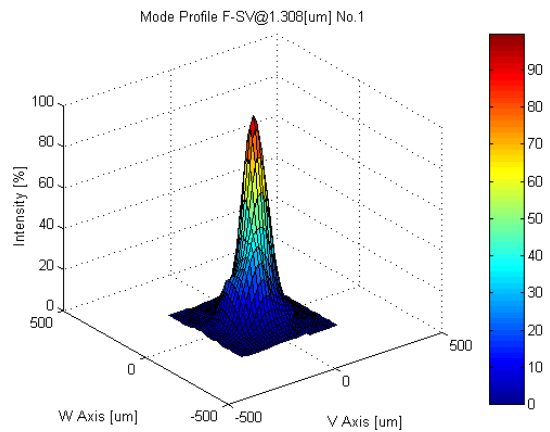
図 3.4.38 にそれぞれのビームプロファイルを示す。

(a)　伝送用ファイバ
モードプロファイル

(b)　伝送用ファイバ
モードプロファイル

(c)　ヘテロコア用ファイバ
モードプロファイル

(d)　ヘテロコア用ファイバ
モードプロファイル

図 3.4.38　ファイバのモードプロファイル

伝送用ファイバのモードフィールド径が 9.2[μm]に対してビームアナライザで計測したモード径が 545.5 μm であったことからビーム径拡大率 58.3 倍が得られる。そしてヘテロコア用ファイバの測定ビーム径が 254.0 μm であったことからヘテロコア用ファイバの波長 1310 μm における推定 MFD 径は 4.35 μm となる。この値を基に推定接続損失を計算すると 2.32dB という結果が得られる。本研究で試作したヘテロコアセンサは 3dB 前後であるがこの値はコネクタの接続損失を含んだ値であることを考慮にいれても、融着による接続損失が大きいと考えられる。

F　複数台の並列接続について

1 台の OTDR に 2 台のヘテロコアセンサを並列に接続した場合の特性を調査する。試験の結線を図 3.4.39 に示す。光スイッチはプリズムによって光の伝搬方向を切り替えるタイプを使用し、外部から電圧によってチャンネルを切り替えた。

試験は光スイッチがない場合、センサを光スイッチの output1 に接続した場合および output2 に接続した場合について行い、挿入損失、感度および繰り返し測定精度を比較する。挿入損失を測定した結果を図 3.4.40 に、感度を測定した結果を図 3.4.41 に、繰り返し測定精度を図 3.4.42 に示す。図 3.4.40～42 から、光スイッチの有無および出力チャンネルの違いによる影響は見られず、光スイッチを使用した並列接続は有効であると判断できる。

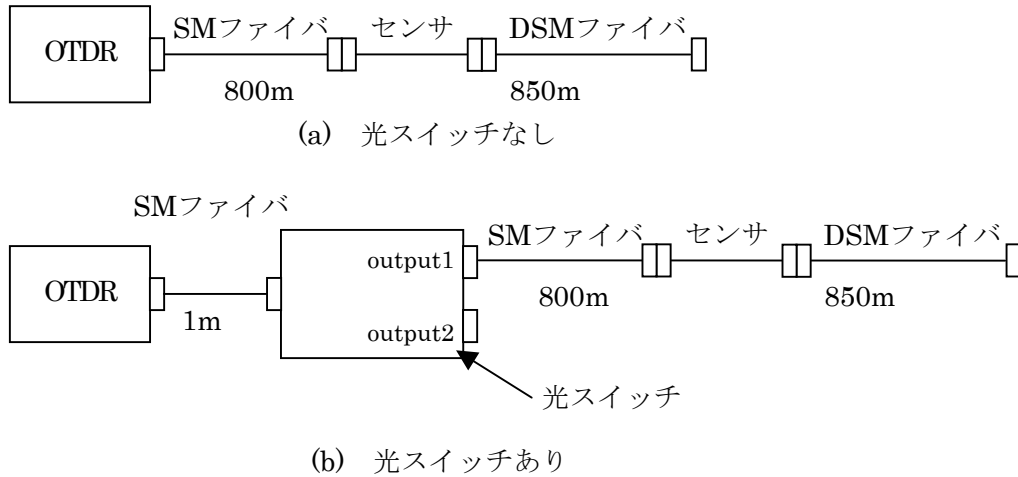



図 3.4.39　結線図

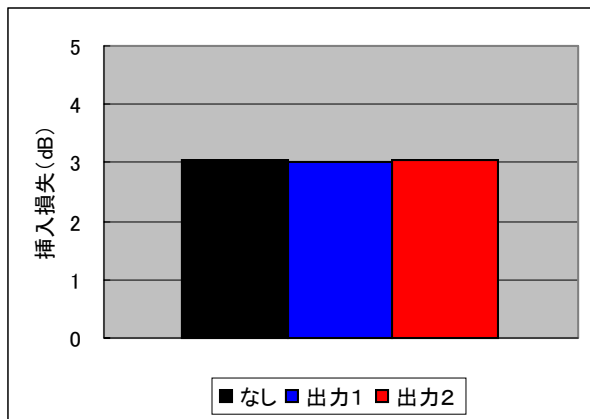



図 3.4.40　光スイッチの影響（挿入損失）

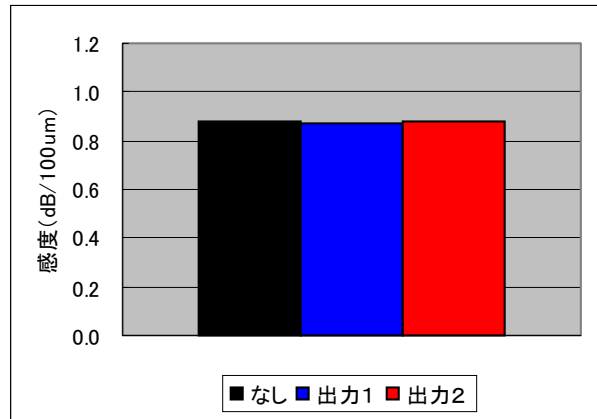



図 3.4.41　光スイッチの影響（感度）

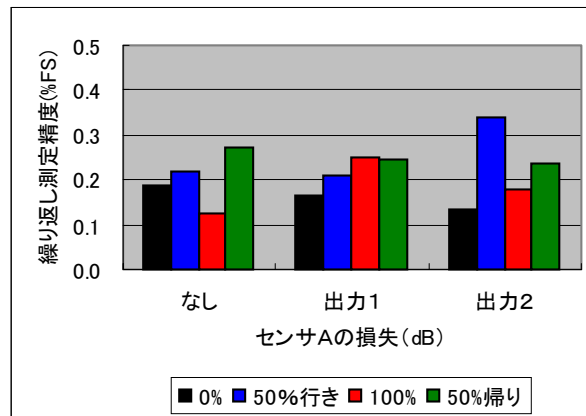



図 3.4.42　光スイッチの影響（繰り返し測定精度１σ）

G　OTDR の計測条件

OTDR の最適な計測条件を調査し、測定精度の向上を目指す。計測条件としてパルス幅、平均回数について検討する。評価の方法はセンサを曲げない状態（約 3dB の損失）で固定し、OTDR による計測を 10 回行う。この 10 個のデータから標準偏差 1σをもとめ、フルスケールに対する誤差として表す。各条件での結果を比較し最適な条件を決定する。図 3.4.43 にパルス幅に対する標準偏差 1 σを示す。図 3.4.43 からパルス幅 100ns が最もバラツキが小さいことがわかる。平均回数は測定時間と相関があり、平均回数を増やすと測定時間も増える。水位計の要求仕様として、データの更新は遅くとも数十秒毎に行う必要があり、測定時間はなるべく短い方が好ましい。図 3.4.44 に平均回数に対する測定時間を示す。測定時間としては水位計への使用に耐えうる最長値を 30 秒として測定回数は最大 2^{15} 回とする。図 3.4.45 に平均回数に対する標準偏差 1 σを、また参考までに 2^{15} 回以上の平均回数に対する標準偏差 1 σを図 3.4.46 に示す。図 3.4.45 から平均回数が多い程バラツキが減ることがわかる。図 3.4.46 は、0%（曲げを加えない状態）だけのデータであるが、やはり平均回数が多い程バラツキが減る傾向が見られる。OTDR 計測における OTDR の測定条件として、パルス幅は 100ns、平均化回数は 2^{15} 回とする。

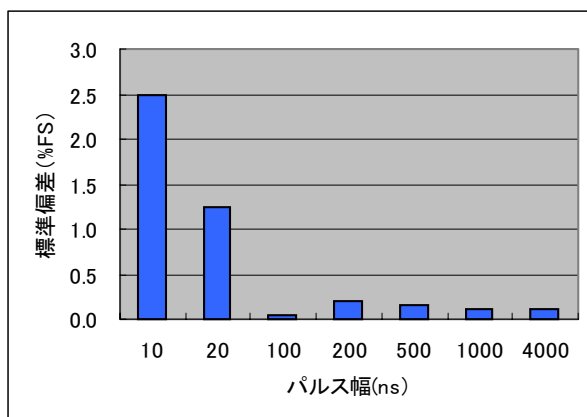



図 3.4.43　パルス幅に対する標準偏差１σ

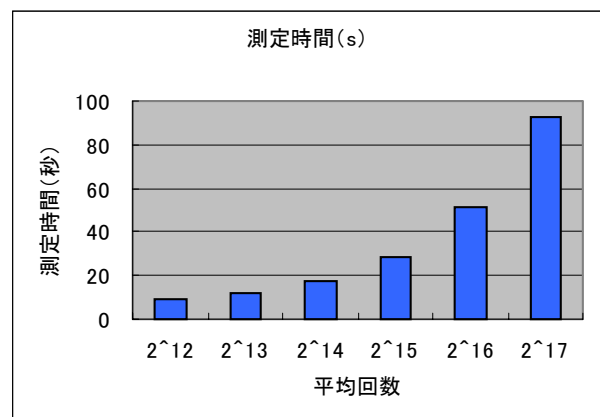



図 3.4.44　平均回数に対する測定時間

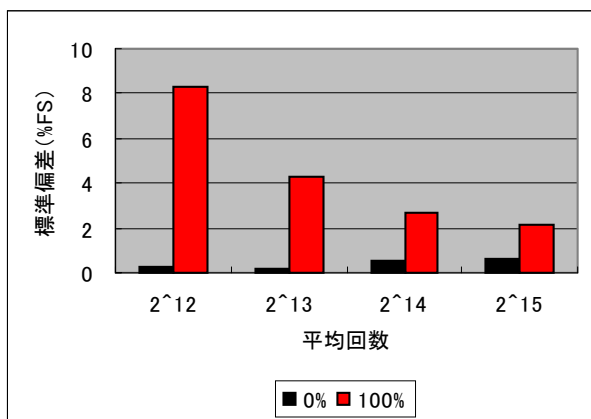



図 3.4.45　平均回数に対する標準偏差 1σ

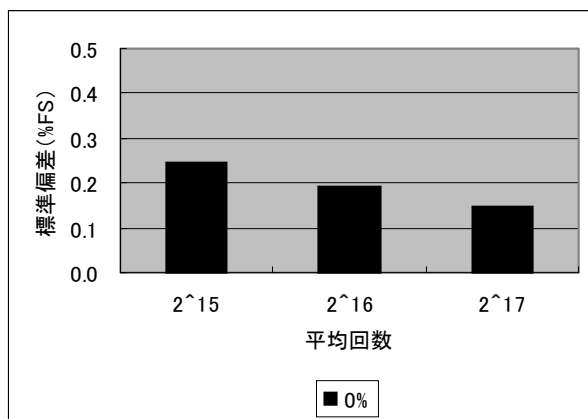



図 3.4.46　平均回数に対する標準偏差 1σ

H　水位計モジュール製作のために決定した諸条件

ヘテロコアセンサを水位計に応用するために、センサの基本特性調査および、より高精度な計測を行うためのファイバ構成の工夫や OTDR の測定条件の検討を行ってきた。これらの結果から決定した諸条件を表 3.4.3 に示す。

表 3.4.3　水位計モジュール製作のために決定した諸条件

項　目		検討内容	検討結果
ヘテロコア径		3,4,5 ㎛	4 ㎛
ヘテロコアの挿入長		3～5mm	3mm
ひずみを与える方向		長手方向、垂直方向	長手方向、垂直方向
長手方向	取付け長	50,80,236mm	約 100mm
	変位量		約 150 ㎛
垂直方向	取付け長	20,25,30mm	25mm
	変位量		約 100 ㎛
	ロッド直径	12,20mm	20mm
	ロッドとヘテロコア部のずれ	-2～+2mm	±500 ㎛ まで許容する。
	取付け長の変化	取付け長の変化の影響	取付け長の変化は長手方向に変位を加える事と等価であり、温度変化による取付け長変化を防ぐ必要がある。 取付け長が 2 ㎛ の変化に対し損失値が 0.56%FS 変化する。
ファイバ構成		ヘテロコア部以外のファイバを SM と DSM の組み合わせ	ヘテロコア部の前方に SM ファイバ、後方に DSM ファイバをそれぞれ 100m 以上入れる。
OTDR の測定条件	パルス幅	10ns～4μs	100ns
	平均回数	2^{12}～2^{17}回	2^{15}回
複数台接続の可能性と諸条件	直列接続	2 台	2 台のセンサを直列に接続したが、再現性が約 4%FS になってしまい、計測器の改善が必要である。
	並列接続	2 台	2 チャンネルの光スイッチを使用して並列接続の影響を調査した結果、影響は見られず並列接続可能と判断できる。

参考文献

1) 大澤孝治他、フジクラ技報　第 102 号、pp22-25、「融着接続における損失推定の改善」

３．５　圧力－変位変換モジュールの製作と評価

３.４節で得られたヘテロ構造の条件から変位に対する損失変化量にあわせたひずみセンサモジュールの設計・製作を行う。

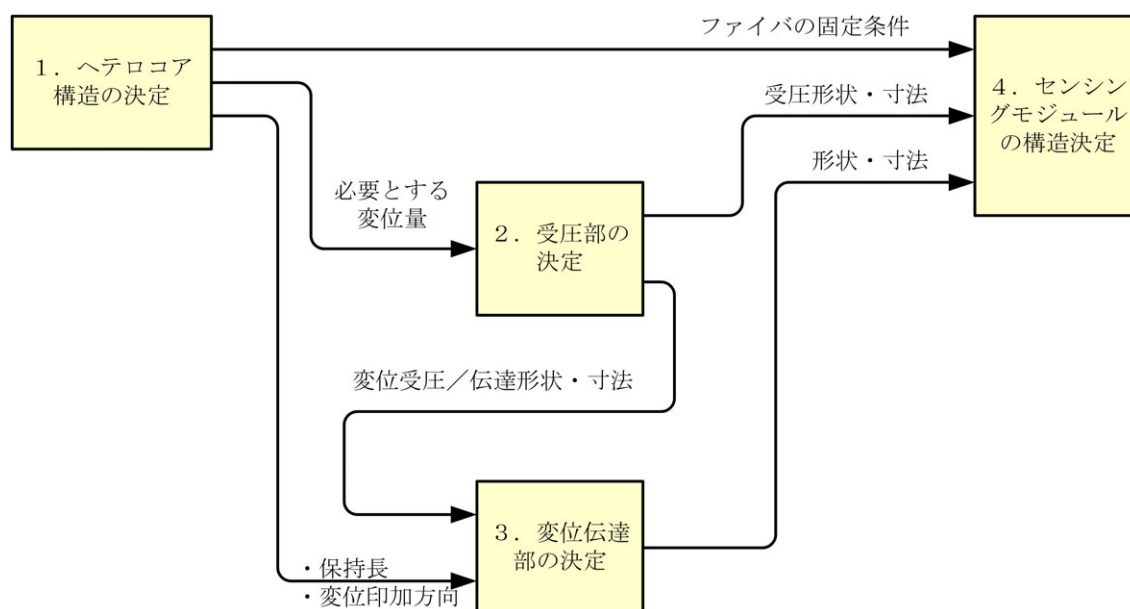



図 3.5.1　圧力変換機構の決定フロー

Ａ　水位－変位変換機構の設計と製作

（１）変換機構の構造調査

水位計に用いられる圧力－変位変換機構について特徴を表3.5.1と概略図を図3.5.2に示す。これらの中で最も構造が単純なのはダイヤフラムである。ダイヤフラムの変位量は1mm程度であるが、9-4-9型ヘテロコアセンサと組み合わせた場合にダイヤフラムの変位を直接ヘテロコアセンサに伝達するというきわめてシンプルな構造で水位計測の実現が可能になると考えられる。

一方構造は若干複雑となるが変位量が大きくとれる他の2方式においては創価大学の成果、9-5-9型の適用も可能と考えられる。

本研究では少ない変位量でなおかつきわめてシンプルな構成が実現可能と考えられるダイヤフラムを受圧部とした圧力－変位変換モジュールを設計・製作することとした。

表 3.5.1　圧力－変位変換機構の諸元（水位計として使用可能な形状寸法内での値）

名称	特徴	変換機構のタイプ	変位方向	変位量	適用可能ヘテロコアセンサ
ダイヤフラム	圧力差を薄い円板の変形で変位を与える	平板状	直線	～1mm程度	・９－３－９型
		波板状			・９－４－９型
ブルドン管	圧力に対して中空曲管の弾性変形で変位を与える	スパイラル型	円弧	数cm	９－５－９型
		Ｃ型	直線（径）	～5mm程度	９－５－９型
		ヘリカル型			９－５－９型
ベローズ	圧力差を蛇腹の伸縮により変位を与える		直線	～5mm程度	９－５－９型

(a)　ブルドン管（スパイラル）

(b)　ダイヤフラム

(c)　ベローズ

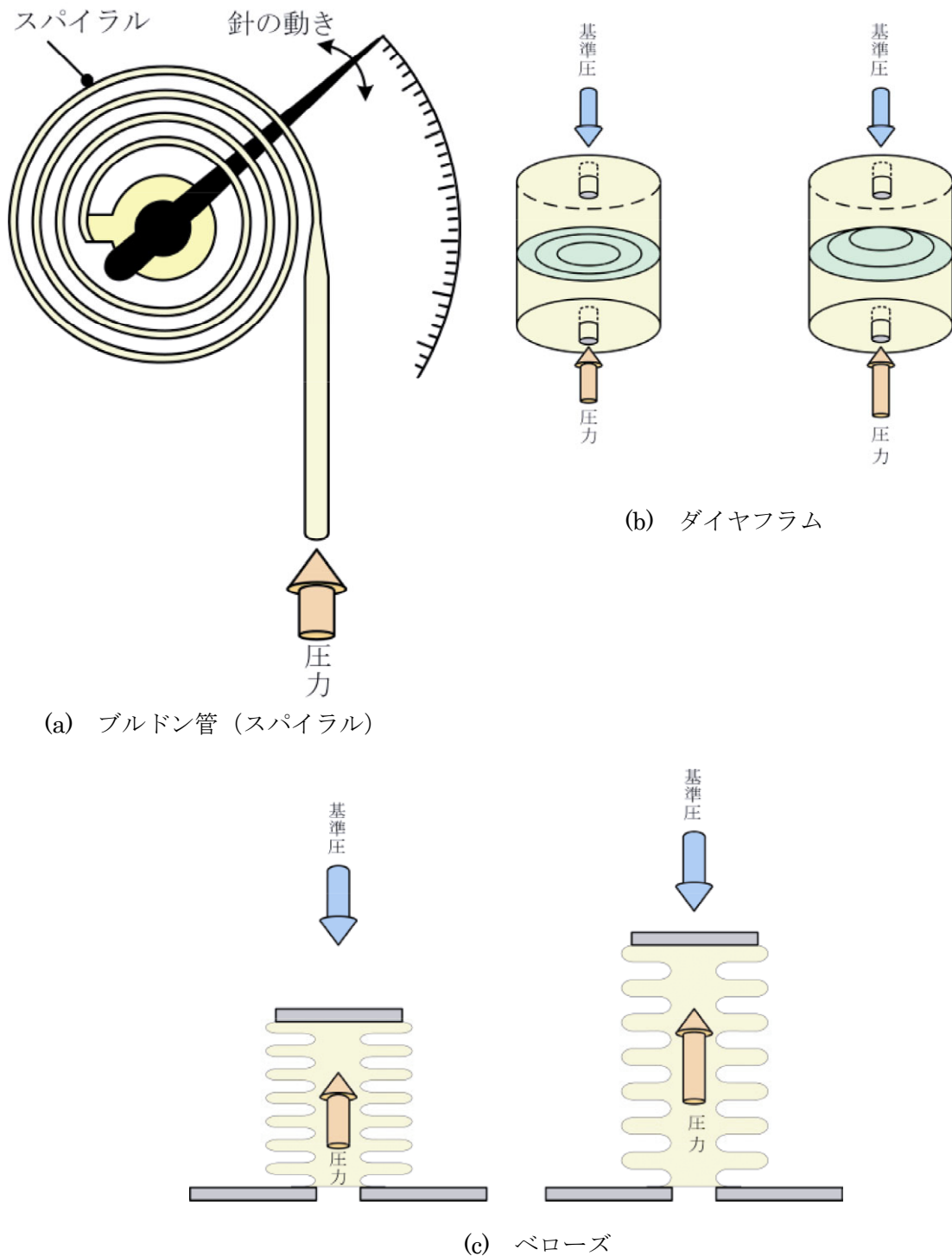



図 3.5.2　圧力－変位変換機構の種類

（２）圧力変位変換機構の検討

３.４節の結果からヘテロコア光ファイバセンサはヘテロコア部に曲げ応力を加えた場合、固定長の変化による長手方向のたわみにという二つのひずみを加える方法での実験をおこなった。そこで図 3.5.3 に示す二つの構成を検討し試作検討することとした。

(a)　Type-A：曲げ変位直接印加タイプ

(b)　Type-B：長手方向変位印加タイプ

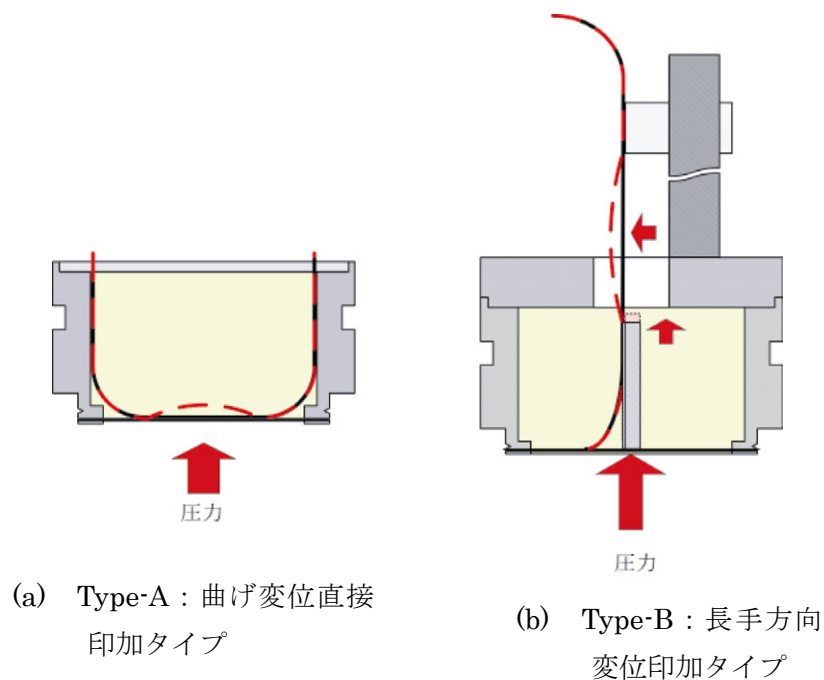



図 3.5.3　圧力－変位変換モジュール　構造図

B　圧力変位変換モジュールの設計と試作

ダイヤフラム型圧力変位変換モジュールについて以下の条件を前提とした構造の基本設計を行い、2 タイプの圧力変位変換モジュールを設計し試作を行った。

・ファイバの実装において、ヘテロコア構造以外で曲げ誘起損失が発生しない程度の曲率とする。

・変位が 0.5mm 程度得られるようなダイヤフラム厚とする。

・径寸法を電気式水位計と同程度の寸法とする。

ここで、ヘテロコアセンサの曲げ変位特性の結果より 0.2mm 程度で 3dB 損失変化を得たが、その実験時に用いた曲率よりもダイヤフラムの径を大きくした。このことから、想定される損失変化は小さくなるものと考えられ、変位量 0.5mm を目標とした。

（1）ダイヤフラム寸法の検討

圧力による変位はダイヤフラムの板厚と直径および材質で決まる。そこで、板厚と直径をパラメータとした理論検討を行うこととした。理論検討のモデルとして水位 10m に相当する圧力を均一に加えた時の周辺を固定した円板のたわみをモデルとして厚さと径に対する変位量の計算を行った。その結果を図 3.5.4 に示す。

この結果では 0.5mm の変位を得るには 35mm 以上の直径が必要となるが、実装による曲げ誘起損失が発生しない程度の寸法でできるだけ小さくすることを考慮して板厚を 0.3mm 以下、ダイヤフラム直径を 40mm とし、圧力－変位変換モジュールの試作を行った。図 3.5.5 に試作したモジュールを示す。

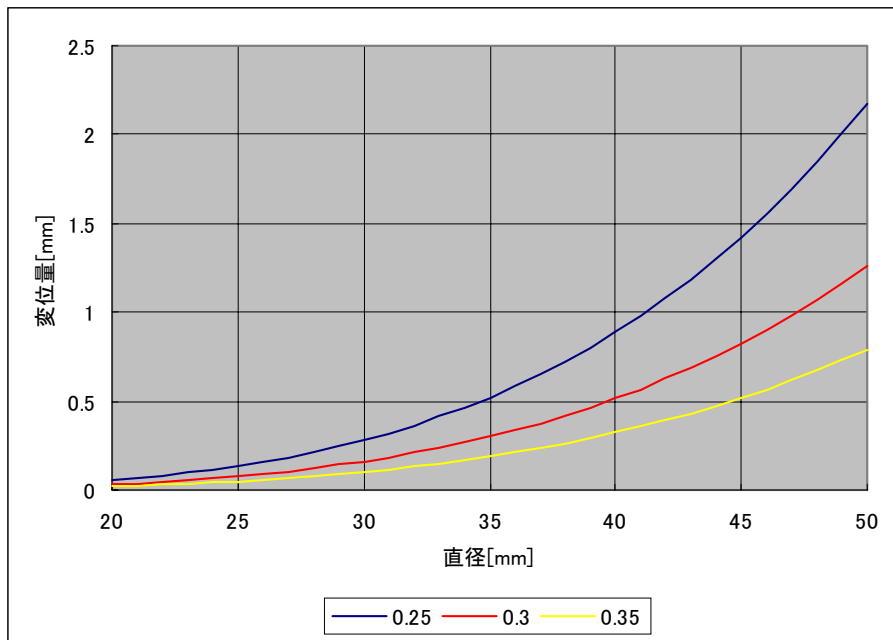



図 3.5.4　ダイヤフラム径に対する変位量計算結果

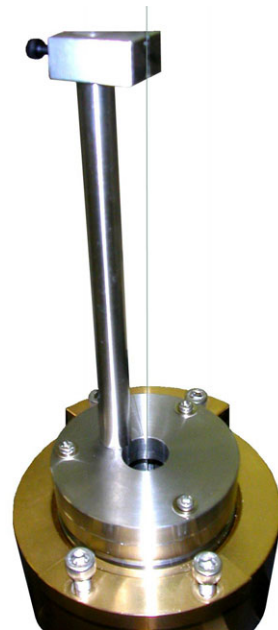
(a)　Type-A

(b)　Type-B

図 3.5.5　圧力－変位変換モジュール外観

Ｃ　圧力－変位変換モジュールの評価

試作した圧力－変位変換モジュールについて圧力に対する変位の特性をレーザ変位計で測定した。加える圧力については水位 0cm から 10m に相当する圧力を加えて変位の特性評価を行った。ここで、圧力と水位の関係式を式 3.5.1 に示す。

$$W_p = k \cdot W_L \qquad \text{式 3.5.1}$$

ここで W_P：水圧 kgf/cm²、k：比例定数（0.1）、W_L：水位 m　である。

（１）実験装置

実験装置の構成を図 3.5.5 に示す。実験は試作したダイヤフラム厚 0.125、0.25､0.3mm の圧力－変位変換モジュールに 0～1kgf/cm² の圧力を加えて行った。計測に用いた測定器の諸元は表 3.5.2 に示すとおりである。

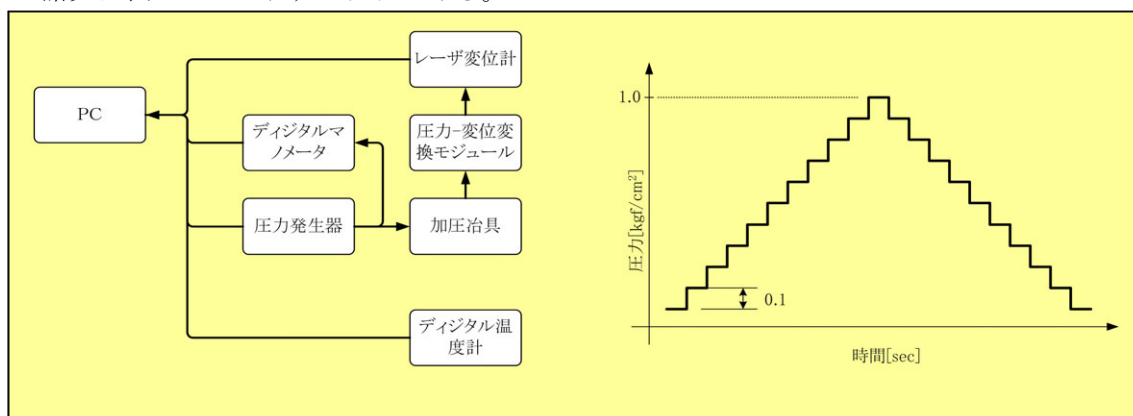



図 3.5.5　圧力－変位特性試験構成と試験条件

表 3.5.2　実験に使用した測定器の諸元

測 定 器 名	型　名	仕　様	
レーザ変位計	ＬＣ－２４００ (キーエンス)	測定範囲	±3mm
		作動距離	30mm
		光源	半導体レーザ
		波長	670nm
		分解能	0.2um
		直線性	±0.05% of FS
		安定度（±5℃）	±0.03% of FS
圧力発生器	ＭＣ１００ (横河電機)	圧力出力範囲	0～200 k Pa
		最小設定分解能	0.01 k Pa
		確度	±0.05% of FS
		ゼロ点温度係数	±0.003% of FS/℃
		スパン温度係数	±0.002% of FS/℃
ディジタル圧力計	ＭＴ２２０ (横河電機)	測定レンジ	0～130 k Pa
		測定確度	±0.02% of rdg
		分解能	0.001 k Pa
		ゼロ点温度係数	±0.001% of FS/℃
		スパン温度係数	±0.001% of FS/℃

（２）ダイヤフラム厚に対する変位量の特性

図 3.5.6 に圧力－変位変換モジュールにレーザ変位計を実装した外観を示す。前項の試験条件で行った結果、圧力に対する変位量はダイヤフラム厚が増加すると変位量が増加する傾向があり、0.3mm のときに理論通りの 0.5mm の変位量が得られた。この結果からダイヤフラム厚 0.3mm について数個作成し圧力－変位特性の評価を行うこととした。Type-B については板厚 0.3mm のみの結果であるが、Type-A と比較すると変位量が半分程度しか得られなかった。３.４節の結果からひずみの印加方向によって必要な変位量は垂直方向よりも長手方向の方が必要であるのに対して、今回の結果では変位量が小さいため Type-A についてのみ実験を行うこととした。

図 3.5.6　レーザ変位計と圧力－変位変換モジュール

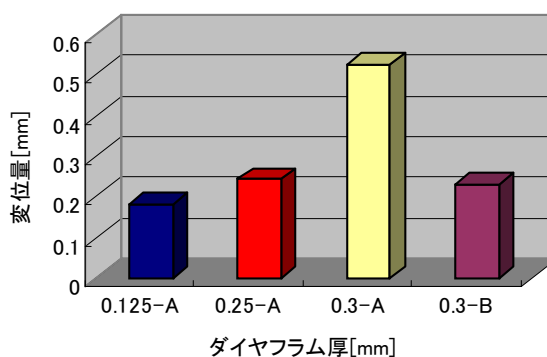



図 3.5.7　ダイヤフラム厚と変位量

（３）変位特性

ダイヤフラム厚 0.3mm の圧力－変位変換モジュール 5 個の圧力に対する変位の特性は表 3.5.3 および図 3.5.8 の結果となった。変位量にばらつきがあるが 10m 相当の圧力に対してどのモジュールも 0.5mm 程度の変位が得られていることを確認できた。

表 3.5.3　圧力に対する変位特性（単位：mm）

圧力	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5	
[kgf/cm^2]	1-加圧	1-減圧	2-加圧	2-減圧	3-加圧	3-減圧	4-加圧	4-減圧	5-加圧	5-減圧
0	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
0.1	0.203	0.205	0.206	0.207	0.126	0.127	0.418	0.422	0.121	0.122
0.2	0.285	0.285	0.295	0.295	0.200	0.201	0.489	0.491	0.205	0.206
0.3	0.339	0.339	0.354	0.355	0.253	0.254	0.538	0.540	0.262	0.263
0.4	0.381	0.382	0.401	0.401	0.297	0.297	0.577	0.578	0.307	0.308
0.5	0.417	0.418	0.439	0.440	0.333	0.334	0.609	0.610	0.346	0.346
0.6	0.448	0.449	0.473	0.473	0.365	0.365	0.637	0.638	0.379	0.379
0.7	0.476	0.476	0.502	0.502	0.392	0.392	0.663	0.663	0.408	0.408
0.8	0.501	0.501	0.527	0.527	0.417	0.417	0.686	0.686	0.434	0.435
0.9	0.524	0.524	0.551	0.551	0.440	0.440	0.707	0.707	0.458	0.458
1	0.546		0.573		0.460		0.726		0.480	

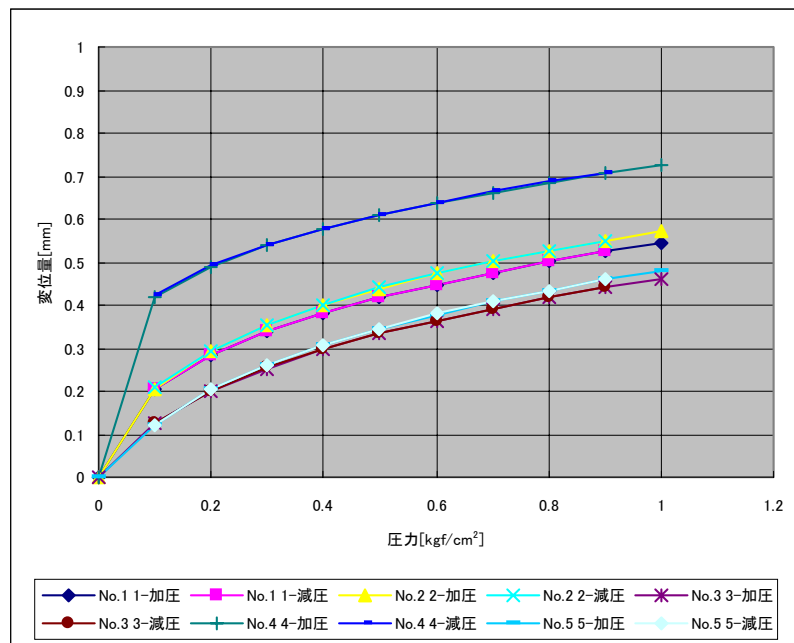



図 3.5.8　圧力に対する変位特性

（4）測定再現性

圧力に対する変位特性における測定再現性を表 3.5.4 および図 3.5.9 に示す。

測定再現性は 0～10m の変化に相当する変位量の幅（スパン）で各設定値の変位量の標準偏差（1 σ）を割り百分率で求めたものである。この結果では測定再現性が 0.1%以下であったのは No.3（平均 0.067%）と No.5（0.027%）であった。計測時に圧力も同時に計測を行ったが圧力の再現性は 0.1%未満であったことから、ダイヤフラムの変位の再現性あるいは試験精度の問題と考えられる。

表 3.5.4　圧力―変位変換機構の測定再現性（1 σ、単位 [% F.S.]）

圧力	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5	
[kgf/cm²]	1-加圧	1-減圧	2-加圧	2-減圧	3-加圧	3-減圧	4-加圧	4-減圧	5-加圧	5-減圧
0	0.449		0.312		0.029		0.179		0.072	
0.1	0.637	0.592	0.288	0.322	0.094	0.077	0.112	0.109	0.046	0.032
0.2	0.446	0.416	0.314	0.358	0.166	0.124	0.117	0.106	0.027	0.028
0.3	0.360	0.329	0.328	0.329	0.059	0.061	0.124	0.113	0.028	0.028
0.4	0.320	0.285	0.266	0.248	0.036	0.043	0.128	0.119	0.020	0.018
0.5	0.298	0.257	0.243	0.272	0.065	0.054	0.130	0.119	0.019	0.019
0.6	0.310	0.274	0.318	0.266	0.055	0.051	0.136	0.128	0.025	0.021
0.7	0.325	0.296	0.424	0.469	0.039	0.048	0.140	0.130	0.013	0.019
0.8	0.353	0.328	0.231	0.214	0.037	0.047	0.141	0.135	0.022	0.018
0.9	0.352	0.349	0.204	0.200	0.074	0.079	0.137	0.140	0.029	0.026
1	0.388		0.218		0.070		0.140		0.037	

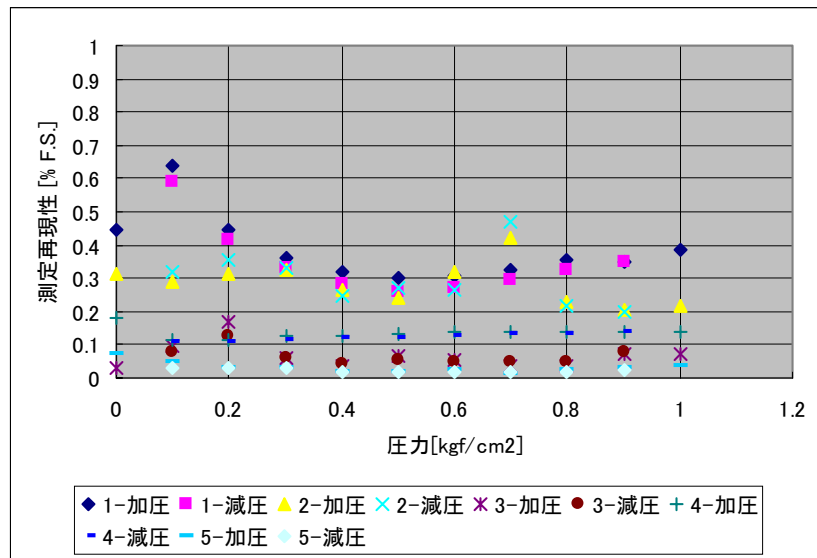



図 3.5.9　圧力－変位変換モジュールの測定再現性

そこで、試験時の温度変化と変位量の相関関係を解析した。それぞれの温度と変位の相関係数をまとめた結果を図 3.5.10 に、また図 3.5.11 に顕著な例を示す。

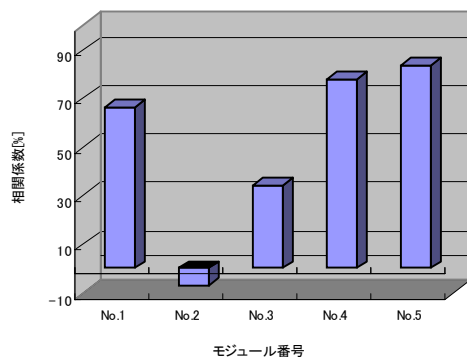



図 3.5.10　温度に対する相関係数

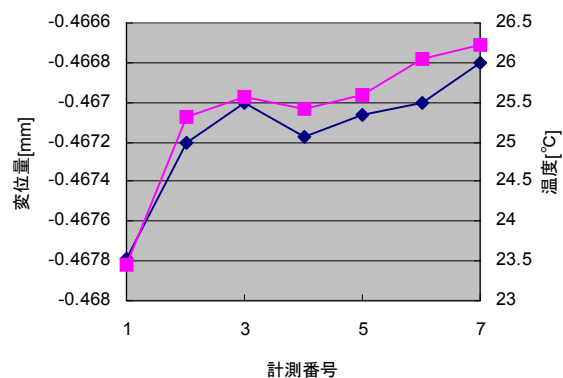



図 3.5.11　計測毎の変位と温度

この結果からモジュール No.2 をのぞいてほとんどが温度の影響を受けて、測定再現性に影響を与えていると考えられる。この状態でヘテロコア光ファイバセンサを実装し、同様の試験を行っても再現性が得られないと判断し、圧力－変位変換モジュールを温度一定の恒温状態にして圧力－変位特性を評価することとした。

温度を恒温状態にした状態での試験による測定再現性の試験結果を表 3.5.5、図 3.5.12 に示す。No.1、No.2 についてはすでに水位センサモジュールとして実装したために比較評価を行うことができなかったが、他のモジュールは温度を恒温状態にすることで 0.1% 以下の測定再現性が得られることが確認できた。

表 3.5.5　恒温制御後の測定再現性（1 σ、単位［% F.S.]）

圧力 [kgf/cm²]	No.3		No.4		No.5	
	3-加圧	3-減圧	4-加圧	4-減圧	5-加圧	5-減圧
0	0.051		0.010		0.068	
0.1	0.029	0.036	0.017	0.012	0.076	0.073
0.2	0.023	0.039	0.017	0.013	0.059	0.062
0.3	0.025	0.024	0.027	0.013	0.049	0.064
0.4	0.037	0.043	0.027	0.012	0.045	0.071
0.5	0.036	0.037	0.025	0.009	0.046	0.076
0.6	0.026	0.041	0.035	0.014	0.032	0.082
0.7	0.033	0.042	0.047	0.016	0.020	0.081
0.8	0.039	0.045	0.053	0.067	0.010	0.081
0.9	0.037	0.043	0.063	0.067	0.016	0.078
1	0.038		0.066		0.011	

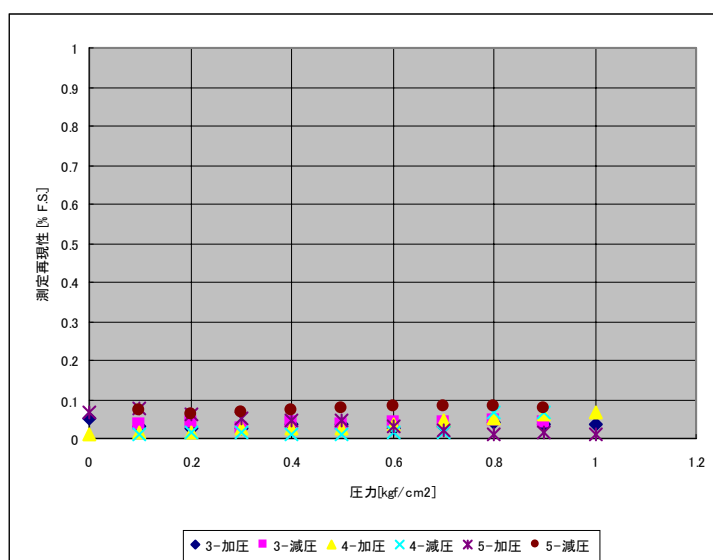



図 3.5.12　恒温制御後の測定再現性

（5）ヒステリシス特性

ダイヤフラム厚 0.3 の No.1～5 についてそれぞれ加圧時と減圧時の変位量の差(平均値)を求め変位量の幅（スパン）で割り、加圧時と減圧時でのヒステリシス特性について解析をおこなった結果を表 3.5.6 と図 3.5.13 に示す。

全体的な傾向として加圧時より減圧時の変位量が小さく、圧力が小さくなると変位量の差が大きくなる傾向がある。加圧と減圧で 0.5% F.S.の誤差を持つことになる。

表 3.5.6　ヒステリシス特性（単位［% F.S.］）

圧力 [kgf/cm^2]	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
0.1	-0.253	-0.180	-0.121	-0.478	-0.117
0.2	-0.154	-0.012	-0.140	-0.339	-0.126
0.3	-0.112	-0.089	-0.087	-0.261	-0.152
0.4	-0.118	-0.073	-0.049	-0.201	-0.156
0.5	-0.082	-0.075	-0.040	-0.158	-0.153
0.6	-0.071	-0.061	-0.019	-0.124	-0.142
0.7	-0.054	-0.076	-0.011	-0.097	-0.116
0.8	-0.061	0.000	0.002	-0.064	-0.084
0.9	-0.036	-0.023	0.004	-0.034	-0.063

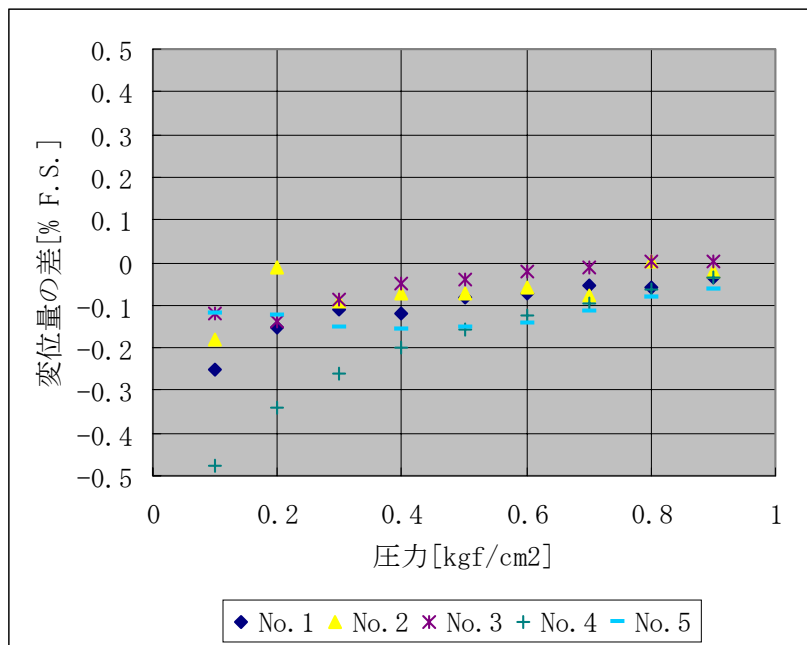



図 3.5.13　ヒステリシス特性（単位［% F.S.］）

（６）圧力−変位変換モジュール開発のまとめ

これまでの結果から変位量としては目標とする変位量 0.5mm を得ることができたが、水位計測モジュールとして実用化を目指すには温度に対する安定性の向上およびヒステリシス特性の改善が必要となる。

本研究ではヘテロコア光ファイバセンサを用いたひずみ計測において、圧力に対するヘテロコアセンサの特性を評価することを目的として圧力−変位変換モジュールにおける課題に対して温度を恒温に近い状態に保ち、加圧と減圧による変位区別することで評価を行うこととした。

３．６　水位センサモジュールの製作および評価

前項で評価を行った 9-4-9 型ヘテロコアセンサを圧力－変位変換モジュールに組み付け水位センサモジュールを製作し、圧力に対する損失特性の評価を行う。

Ａ　水位センサモジュールの製作

水位センサモジュールは圧力－変位変換モジュールのダイヤフラム部中心にヘテロコアセンサ部を光学接着剤で固定した。製作は OTDR で挿入損失を計測しながら行い、取り付けによる損失の増加が起こらないことを確認しながら行った。製作したセンサモジュールの挿入損失を表 3.6.1 に示す。センサ No.1 はセンサ単体時よりも損失が小さく、No.2,3 はほぼ同じ損失、そして No.4,5 はセンサ単体時よりも損失が大きくなった。No.1～3 についてはコネクタの接続損失のばらつきによる損失の変化が考えられるが、No.4,5 に関しては光学接着剤が固化する過程で曲げが加わり、固定されてしまったと考えられる。

表 3.6.1　水位センサモジュールの諸元

モジュール No.	ヘテロコア長（mm）	挿入損失（dB）（センサ単体）	挿入損失（dB）（モジュール組付後）
No.1 (※)	3.00	3.30	3.06
No.2	2.94	3.22	3.29
No.3	3.04	3.23	3.26
No.4	3.05	3.15	3.78
No.5	4.02	2.80	3.75

※No.1 は測定後ファイバが切断したため、この後の測定できず

Ｂ　水位センサモジュールの評価

水位センサモジュールの評価は圧力－変位変換モジュールの評価と同様の条件で行った。試験の構成を図 3.6.1 および外観を図 3.6.2 に示す。

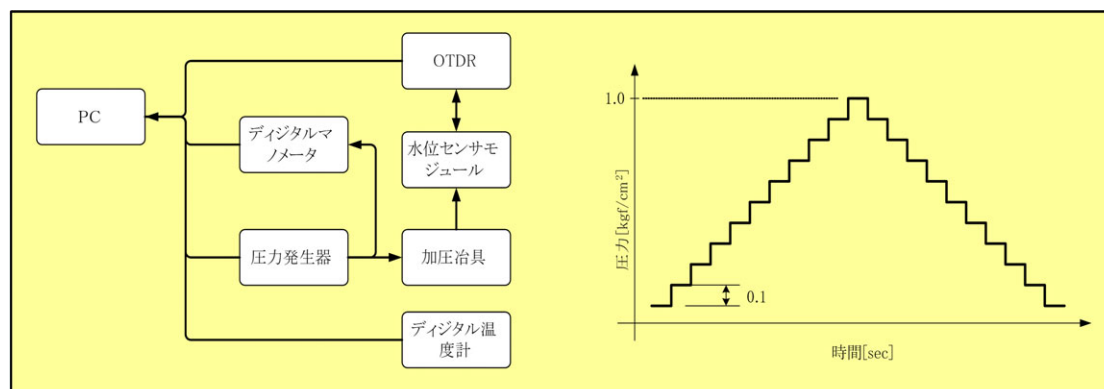



図 3.6.1　圧力－損失特性試験構成

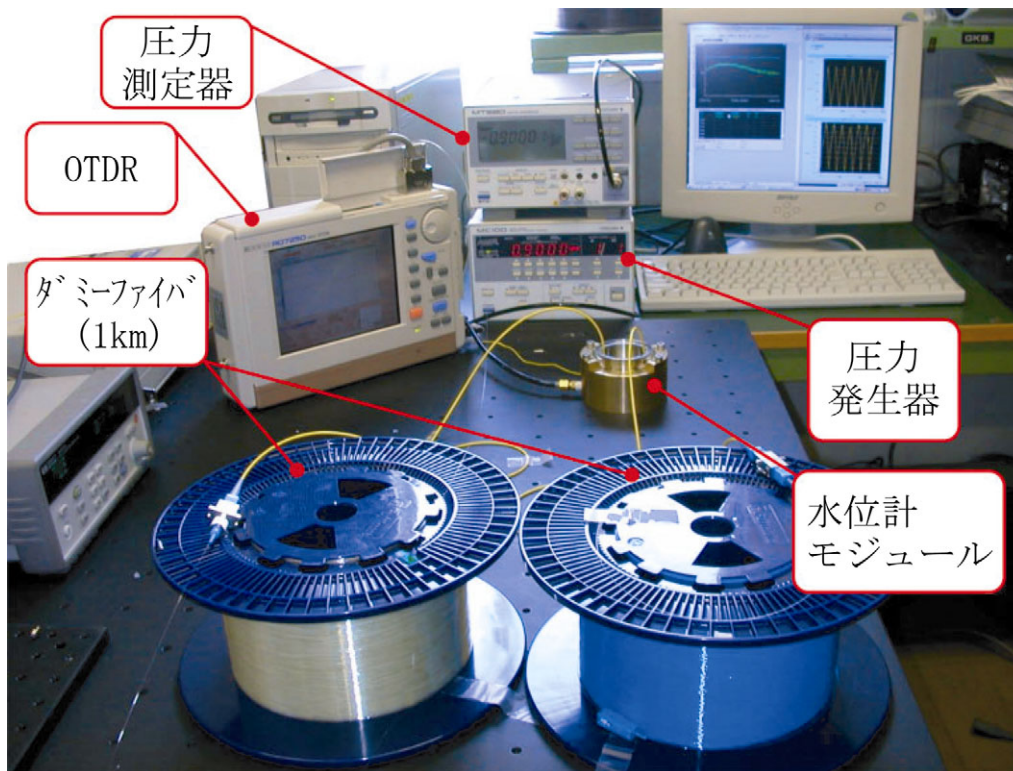



図 3.6.2　圧力－損失特性試験外観

（1）圧力－損失特性

図 3.6.2 の構成で行った試験結果について挿入損失を差し引いた圧力に対する損失変化特性を図 3.6.3 に示す。損失変化特性は圧力－変位変換特性の変化と同様の傾向を示していることが確認できた。

しかし、損失変化量については 0～10m 相当の圧力に対する変位量においてセンサ単体時の 30～60%減少している（表 3.6.2 参照)。

これは単体試験時に変位を与えた曲率よりも大きな曲率のために損失変化が小さくなったものと考えられる。

このため繰り返し測定精度の評価においてセンサ単体の損失変化量と固定後の損失変化量の 2 つの場合について評価を行う。

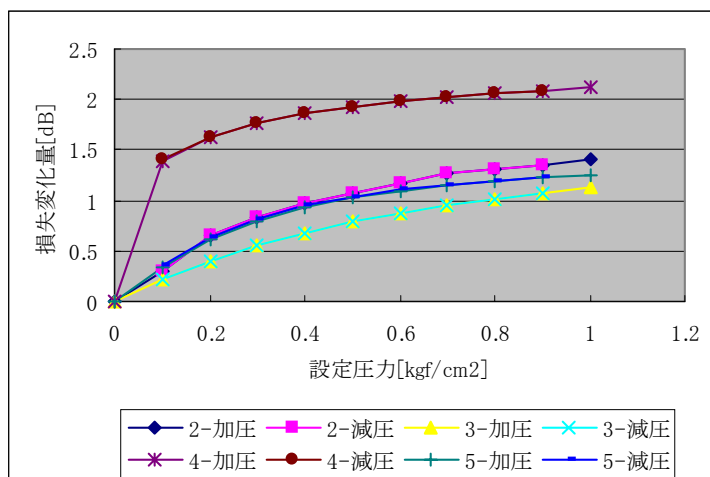



図 3.6.3　圧力－損失特性

表 3.6.2　水位センサモジュールの諸元

モジュール No.	損失変化量（dB）（単体時）	損失変化量（dB）（組込後）	ダイヤフラム変位量（mm）
No.2	1.99	1.33	0.573
No.3	2.42	1.12	0.468
No.4	2.48	2.11	0.744
No.5	2.48	1.26	0.483

（2）繰り返し測定精度

センサモジュールに組み込んだ損失変化量を基に圧力に対する損失の繰り返し測定精度を表 3.6.3 および図 3.6.4 に示す。この結果ではセンサモジュール No.2 は 0.05～0.119%とほぼ 0.1%の繰り返し測定精度を得ることができたが、他のモジュールは 0.2%を超える値があった。これは３.４節でもふれたが OTDR の測定分解能が 0.001dB に対して損失変化量が 1dB 程度であったため、OTDR の読み取り精度の影響を受けるためと考えられる。

表 3.6.3　水位センサモジュールの繰り返し測定精度（1σ% F.S.）

	No.2		No.3		No.4		No.5	
設定圧力	2-加圧	2-減圧	3-加圧	3-減圧	4-加圧	4-減圧	5-加圧	5-減圧
0.000	0.064		0.126		0.039		0.174	
0.100	0.064	0.078	0.126	0.224	0.033	0.097	0.118	0.159
0.200	0.060	0.050	0.126	0.241	0.058	0.086	0.091	0.153
0.300	0.060	0.050	0.102	0.215	0.118	0.070	0.131	0.203
0.400	0.093	0.119	0.102	0.135	0.143	0.109	0.266	0.133
0.500	0.093	0.081	0.141	0.102	0.136	0.078	0.251	0.357
0.600	0.093	0.108	0.159	0.232	0.142	0.147	0.181	0.142
0.700	0.081	0.078	0.102	0.203	0.251	0.088	0.165	0.066
0.800	0.106	0.064	0.149	0.141	0.084	0.039	0.153	0.172
0.900	0.064	0.060	0.215	0.089	0.238	0.195	0.215	0.199
1.000	0.087		0.185		0.154		0.153	

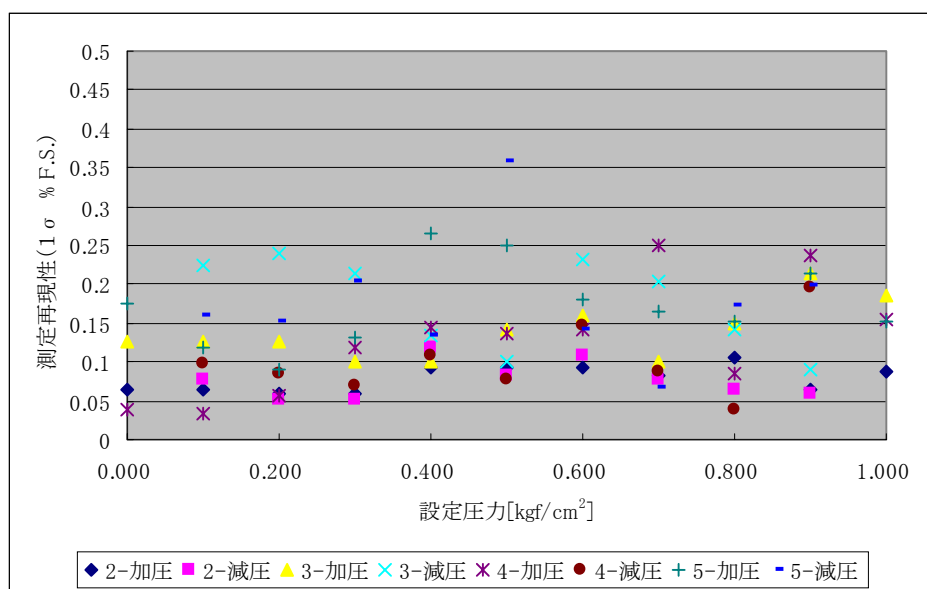



図 3.6.4　水位センサモジュール繰り返し測定精度

センサ No.4 については他のモジュールと比較すると変位量が大きかったが、0 から 0.1kgf/cm² の区間での変化量が極端に大きくそれ以外の区間での変位量はむしろ他のモジュールより少ないことが再現性に影響を与えていると考えられる（表 3.6.4 参照）。また、No4､5 はセンサ単体時よりも挿入損失が大きいことも再現性に影響を与えていると考えられる。

表 3.6.4　圧力変化区間における損失変化量

圧力変化区間	No.2	No.3	No.4	No.5
0→0.1	0.303	0.215	1.391	0.343
0.1→0.2	0.350	0.189	0.240	0.276
0.2→0.3	0.187	0.153	0.139	0.184
0.3→0.4	0.126	0.124	0.093	0.131
0.4→0.5	0.111	0.104	0.068	0.095
0.5→0.6	0.088	0.088	0.052	0.071
0.6→0.7	0.096	0.076	0.043	0.054
0.7→0.8	0.045	0.065	0.036	0.043
0.8→0.9	0.052	0.058	0.030	0.033
0.9→1.0	0.044	0.051	0.026	0.029

ここで、センサ単体時の損失変化量を基に繰り返し測定精度を評価すると、表 3.6.5、図 3.6.5 のような結果となった。この結果からセンサ No4 については 0.2%を超えるデータもあったが、他のモジュールは繰り返し測定精度 0.1%をほぼ満足する結果が得られている。

表 3.6.5　センサ単体時の損失変化量とした時の繰り返し測定精度（1 σ%　F.S.）

	No.2		No.3		No.4		No.5	
設定圧力	2-加圧	2-減圧	3-加圧	3-減圧	4-加圧	4-減圧	5-加圧	5-減圧
0.000	0.045		0.058		0.034		0.088	
0.100	0.045	0.055	0.058	0.104	0.029	0.083	0.060	0.081
0.200	0.042	0.036	0.058	0.112	0.049	0.073	0.046	0.078
0.300	0.042	0.036	0.047	0.100	0.101	0.060	0.066	0.103
0.400	0.066	0.084	0.047	0.063	0.122	0.093	0.135	0.067
0.500	0.066	0.057	0.065	0.047	0.116	0.066	0.128	0.181
0.600	0.066	0.076	0.074	0.108	0.121	0.126	0.092	0.072
0.700	0.057	0.055	0.047	0.094	0.215	0.075	0.084	0.034
0.800	0.075	0.045	0.069	0.065	0.072	0.034	0.078	0.087
0.900	0.045	0.042	0.100	0.041	0.204	0.166	0.109	0.101
1.000	0.062		0.086		0.132		0.078	

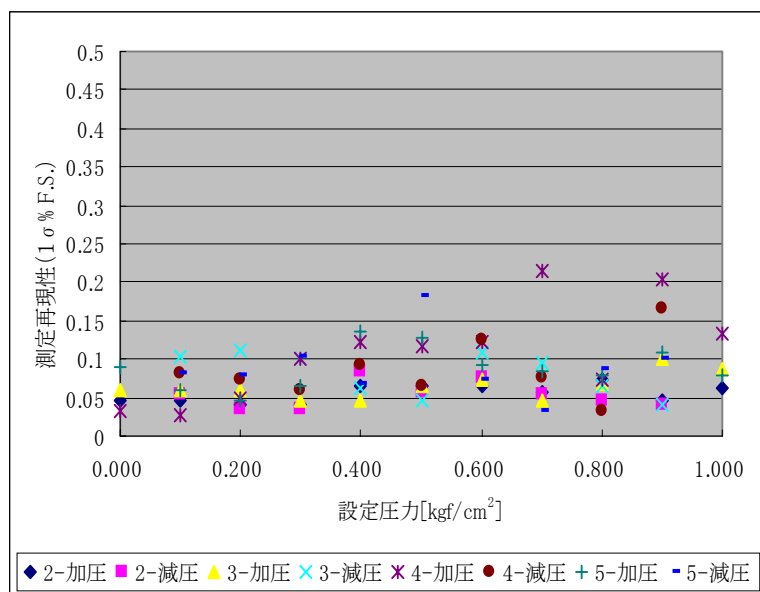



図 3.6.5　センサ単体時の損失変化量とした時の繰り返し測定精度

（3）水位計としての特性評価

圧力－損失特性の結果を基に式 3.5.1 から水位センサモジュールとしての特性について再現性が最も良好であったセンサ No2 について行う。

まず計測した損失値から圧力換算を行うために近似式を求めた。近似式は多項式近似によって 3 次から 5 次まで算出し、損失から推定した圧力値と実際の圧力値の残差を図 3.6.6 に示す。それぞれの近似式の標準誤差は 3 次：0.013、4 次：0.011、5 次：0.007 で 5 次が最も小さいことから 5 次による近似が有効であると判断した。

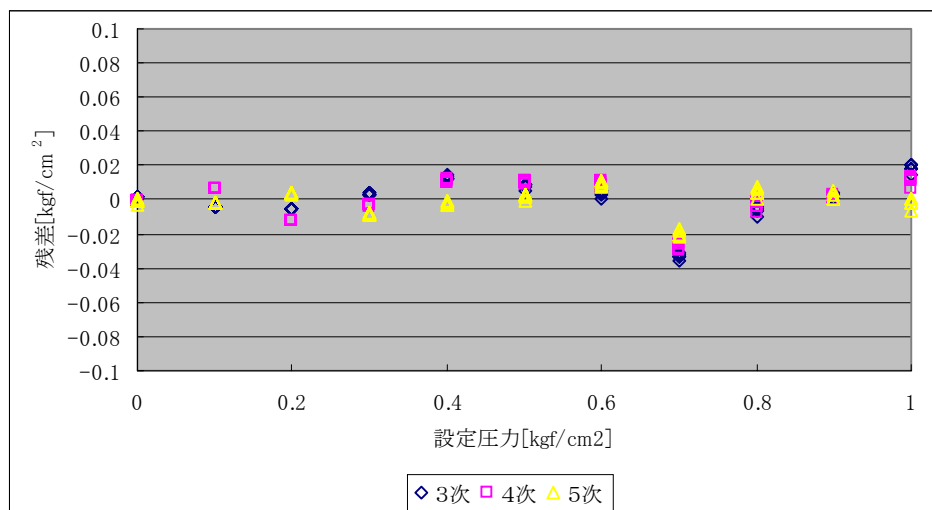



図 3.6.6　近似式の残差特性

また、近似した圧力から水位換算を行い、設定圧力に対する水位および圧力に換算した特性を図 3.6.7 に示す。

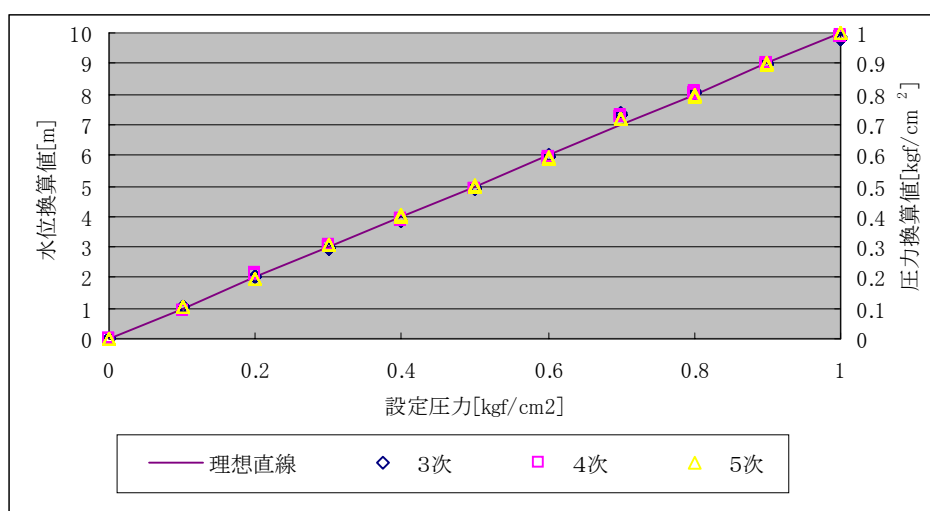



図 3.6.7　圧力に対する水位換算値

（4）まとめ

これまでの結果から圧力－変位変換モジュールが与える変位量がセンサ単体時に行った試験条件よりも曲率が大きかったために、ヘテロコアセンサに与えられる曲げ変位量が小さくなり単体時よりも損失変化量が小さくなってしまった。その結果 OTDR の読み取り精度がセンサの繰り返し測定精度に影響を与えたと考えられる。

しかし、OTDR の計測分解能の向上、あるいは単体時と同等の損失変化量を与える圧力－変位変換モジュールを開発することで、ヘテロコアセンサとしては目標とする繰り返し測定精度 0.1%が実現可能であると判断する。

３．７　今後の課題と取り組み

Ａ　圧力－変位変換モジュールの開発

本研究で開発試作した圧力－変位変換モジュールを実用化するためには更に以下の課題を解決する必要である。

圧力－変位変換モジュールにおける課題：

・ヘテロコアファイバに最適な変位量を与える受圧部の圧力－変位特性の改善

・ヒステリシス特性の改善

・温度特性の改善

また、2.4 章で詳述されている 9-5-9 型ヘテロコアセンサの特長を生かした圧力－変位変換モジュールの開発検討を行う。

Ｂ　ヘテロコア融着技術の確立

本研究の結果からセンサ単体においては高精度水位計測に必要な光損失変化量を得ることができたが、光ファイバセンサ系の損失絶対量が大きいために多点計測への適用は課題が残った。損失量の中ではヘテロコアファイバの接続損失が支配的であるが 3.4.E (2)で解析したように本研究での試作結果は理論値に比較して改善の余地がある。今後の課題として融着における接続損失の低減化技術をさらに追求する。

Ｃ　損失変化量の高精度計測技術の確立

OTDR 計測における現状での損失計測分解能は一般的に 0.001dB であり、ファイバの故障診断においては十分な測定分解能と考えられる。しかし、ヘテロコアファイバの損失変化計測を応用して測定精度 0.1％レベルの高精度水位計測を多点で行うためには現状よりさらに高い測定分解能とダイナミックレンジが必要となり、またリアルタイム計測を可能とする高速処理が必要である。これらの課題を解決するためのヘテロコア光ファイバセンサに特化した計測技術を確立する必要がある。

第４章　屈折率センサモジュールの試作開発

４．１　はじめに

本プロジェクトは、ヘテロコア SPR（Surface Plasmon Resonance）ファイバセンサを用いた、屈折率センサモジュールによるネットワークセンシングの実現である。近年目覚しく発達している携帯電話システムや無線ネットワークの設備を付加することにより、各地から送られてくるデータを一つの監視施設で処理し、早期に危険予知情報を得ることである。この章は主に、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサのグリセリン溶液濃度変化測定に関する検討と研究開発の成果である。

光ファイバ網上で利用を期待されている代表的なセンサは、構造物、自然環境保全のネットワークセンシングシステムである。光ファイバを用いたネットワークセンシングの構造や手法は数多く報告されているが、いまだ広く利用されていない。その理由には FBG（Fiber Bragg Grating）に見受けられるようなセンサ製造段階での複雑性、BOTDR に代表される高価な測定機器、これらに伴うトータルなシステムの高コスト化などが挙げられる。また、実際に計測環境にセンサを敷設することを考えると、コンクリートなどの構造物内部にセンサを埋没させるような方法は、光ファイバの破断に対応するには困難が伴うため、センサをモジュール化し、構造物外部にそぐわせるといった方法が必要である。

ヘテロコアセンサは、微弱なブリルアン散乱光と比較して強度の強いレーリ散乱光を OTDR により計測可能である。このため適度な精度、実時間性をもち、かつ廉価なシステム構成とすることができる [1)]。本プロジェクトは、スパッタ装置により、ヘテロコア部に Au 薄膜を成膜したセンサ部について、それぞれの膜厚に対する表面プラズモン共鳴特性を検討した。

具体的な内容は以下に示す。

A　4.2 節では、高周波マグネトロンスパッタ装置によるヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサ製作について検討した。ヘテロコアファイバ部への成膜条件である真空度[Pa]、Ar 流量[SCCM]、Ar 導入後気圧[Pa]、RF 電源パワー[W]、スパッタ時間[sec]の基本的な検討を行った。また、基板ホルダはヘテロコア部全面に成膜するように、ホルダテーブルの回転とファイバ固定軸の回転の 2 重回転構造で成膜を行った。

B　4.3 節では、白色光源、光スペクトラムアナライザによるヘテロコア Ag 薄膜 SPR ファイバセンサのグリセリン溶液の濃度変化試験について検討した。白色光源の波長は 400nm～1800nm。光スペクトラムアナライザの測定波長範囲は、350nm～1750nm の範囲の測定が可能であり、濃度変化に最適な光源波長を選択できることが特徴である。

C　4.4 節では、Au 薄膜の膜厚変化に対する表面プラズモン共鳴特性について検討した。ヘテロコアセンシング部の Au 薄膜膜厚変化は、スパッタ時間を変化させることによ

って成膜させた。本プロジェクトでは Au 薄膜の膜厚変化に対する表面プラズモン共鳴特性を検討した。また、Au はガラスとの密着性が弱いため境界面に Cr 膜の成膜を試みた。

D　4.5 節では、850nm の LED 光源を使用して、グリセリン溶液濃度変化に対する損失値変化について検討した。LED 光源は、白色光源に比べると、出力レベル安定度が優れているのが特徴である。また、計測した光マルチメータのレベル確度も光スペクトラムアナライザよりも優れている。本プロジェクトでは、LED085 光源、光マルチメータを用い%FS、N%FS の算出を試みた。

E　4.6 節では、センシング部ファイバのモジュール化について検討し、これを用いたヘテロコア屈折率センサモジュールの試作を行った。

F　4.7 節では、各種 Au 薄膜の膜厚、光源、計測器を比較することによって、それぞれの特徴や適用範囲を明確にした。

参考文献

1) 渡辺一弘、伊賀光博、関　篤志：検査技術 2002.6 9-16。

2) K.Watanabe, K.Tajima, Y.Kubota: IEICE TRANS.ELECTRON., VOL.E83-C, NO.3 MARCH2000

3) 渡辺一弘、松原茂明、久保田　譲：計測自動制御学会論文集　第 35 巻　第 1 号　1999 年 1 月

４．２　高周波マグネトロンスパッタ装置によるヘテロコアAu 薄膜 SPR ファイバの作成

スパッタ蒸着には多数の方式があり、電極の構造、スパッタ粒子の発生方式などにより分類することができる。スパッタは高速粒子をターゲットに照射、衝突させれば生ずる現象である。高速粒子としては、グロー放電（プラズマ）で発生した正イオンを用いることが多い。また、イオン源で発生したイオンを高真空槽内で置かれたターゲットに衝突させて、蒸着粒子を発生させるイオンビームスパッタ法もある。イオンビームスパッタは成膜速度が遅いという欠点があるが、高真空中で高純度の薄膜を制御性良く得ることができるため、研究などで盛んに用いられる。なお、生産ではプラズマを用いたスパッタが主に用いられる[1)]。

本プロジェクトでは、高周波マグネトロンスパッタ装置を使用し、ヘテロコア光ファイバセンサ部（約 3cm）に、Cr 膜、Au 膜の 2 層膜の成膜を試みた。スパッタ電力や成膜時間を検討し、表面プラズモン共鳴を用いた屈折率センサへの利用を試みた。

Ａ　高周波マグネトロンスパッタ装置の特徴

高周波マグネトロンスパッタ法は、インピーダンス整合回路を介した高周波（13.56MHz）電源を用いてプラズマを発生させたものである。ターゲット表面は直流的に負電位に自己バイアスされるために絶縁物のターゲットもスパッタすることが可能である。また、マグネトロン放電によってターゲット近傍で多量のイオンを作り、蒸着速度を高める特徴がある。高周波マグネトロンスパッタ装置概略図を図 4.2.1 に示した。陰極（ターゲット）の背後に磁石を取り付け、磁力線の一部が陰極面と平行となるようにしている。この方式では、10^{-3}～10^{-2}Pa 程度の圧力でもイオン電流密度が非常に大きく、真空蒸着法に匹敵する蒸着速度が得られる[1)]。

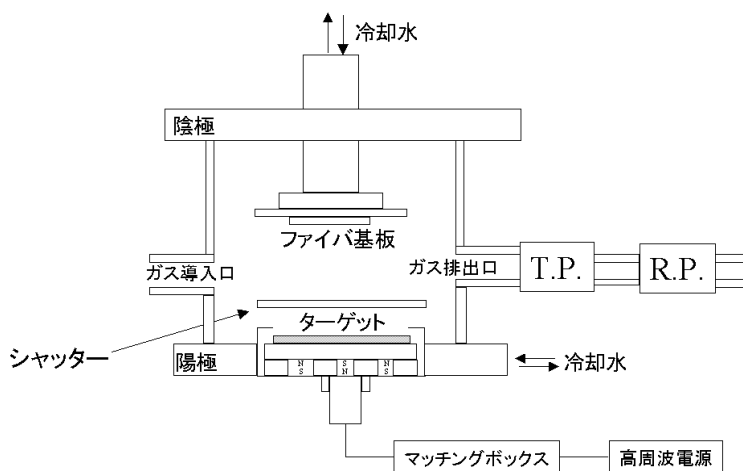



図4.2.1 高周波マグネトロンスパッタ装置

B　スパッタ装置を用いたヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサの検討

<u>ヘテロコア光ファイバ：</u>

本研究で、ヘテロコア部の挿入長について検討した。ヘテロコア部の挿入長を変化させると、センシング部での損失値が異なる。センサを直列に接続した場合、OTDR のダイナミックレンジに関する検討が必要であった。

図 4.2.2 にスパッタ装置に設置するヘテロコア光ファイバの概念図を示す。全長約 16cm、Φ125 ㎛ の中央にコア径 3 ㎛ の光ファイバ 10mm を融着接続により挿入した。

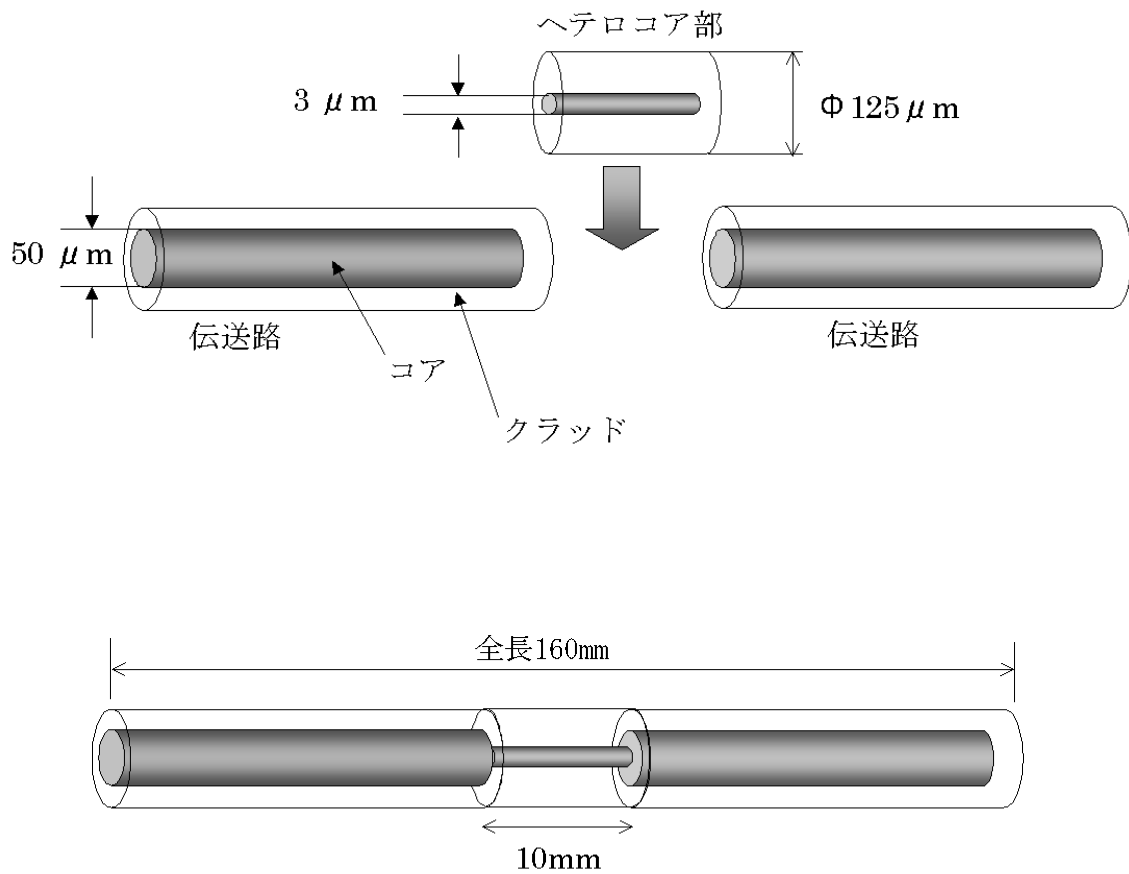



図4.2.2　ヘテロコア光ファイバ部

ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサ作製：

本プロジェクトは、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサ製作手法として、スパッタ装置を用いた。成膜するファイバは Φ125 μm、全長 16cm。成膜部分はファイバ中央 3cm 位である。その他はアルミホイルによるマスクを施した。光ファイバの材質はガラスであり、Au はガラスとの密着性が弱く剥がれることが考えられた。そこで、今回は光ファイバにまず、Cr 膜を作成し、その上に Au 膜を作成した。表 4.2.1 に成膜条件を示す。

表 4.2.1　スパッタ装置による成膜条件

到達真空度［Pa］	6.65×10^{-4}
Ar^{+}イオンガス導入圧力［Pa］	4.9×10^{-1}
Cr 膜スパッタ電力［W］	50
Cr 膜成膜時間［sec］	100
Au 膜スパッタ電力［W］	25,50
Au 膜成膜時間［sec］	200,400,700

成膜した光ファイバの写真を図 4.2.2 に示した。図 4.2.3 には、両端 SC コネクタ付きファイバに接続させた時の写真を示した。また、製作した光ファイバ全体の概略図を図 4.2.4 に示した。

図 4.2.2 の光ファイバ両端をクリーバにより切断し、全長 4cm とした。次に図 4.2.3 に示したように、両端 SC コネクタ付光ファイバに接続させ、モジュールに設置できるよう製作した。このときのヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバの概略図は、図 4.2.4 に示した通りである。全長 4m で、センシング部およびΦ250 μm 部分は 5cm、バッチコードによる保護はΦ2mm である。

図 4.2.2　ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバ部

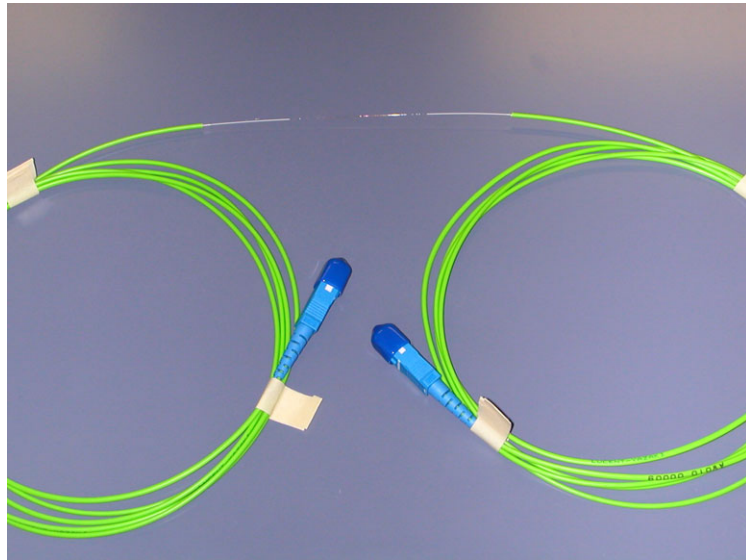



図 4.2.3　SC コネクタ接続時

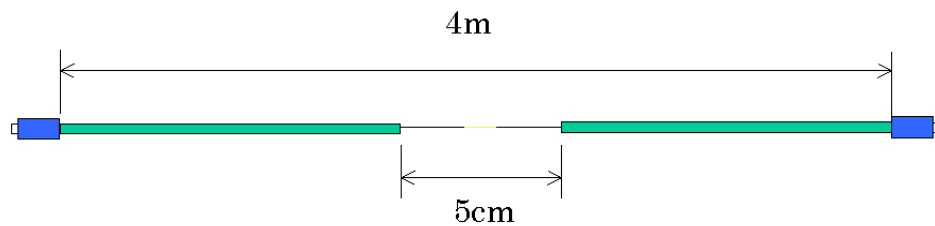



図 4.2.4　ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバ概略図

参考文献

1) 平尾孝、吉田哲久、早川茂：薄膜技術の新潮流　工業調査会

2) 深海龍夫、新谷文比古、直江正彦：金属表面技術 Vol37、No.6、1986

3) 麻蒔立男：薄膜作成の基礎　日刊工業新聞社

4) 高橋　功、鷹野一朗、佐藤光史、沢田芳夫、中根　央：表面技術協会第 100 回講演大会要旨集　P155

5) 高橋　功、鷹野一朗、沢田芳夫、佐藤光史、中根　央：表面技術協会第 101 回講演大会要旨集　P178

6) 高橋　功、鷹野一朗、沢田芳夫、中根　央、佐藤光史：2000 年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集　P397

7) 高橋　功、鷹野一朗、沢田芳夫、中根　央、佐藤光史：第 41 回真空に関する連合講演会講演予稿集　P323-324

8) 高橋　功、鷹野一朗、沢田芳夫、中根　央、佐藤光史：表面技術協会第 102 回講演大会要旨集　P241

４．３　白色光源装置、光スペクトラムアナライザを用いたグリセリン溶液濃度変化試験

Ａ　白色光源装置

測定波長検討のため、波長範囲 400nm～1800nm の白色光源装置を使用した。光源はハロゲンランプであり、光をファイバに効率よく入射させるため光学レンズ系を使用している。光出力は CW 光と 270Hz チョップがある。本プロジェクトでは、被測定系に入るノイズは関係しないため CW 光を使用した。図 4.3.1 に概略図を示す[1)]。

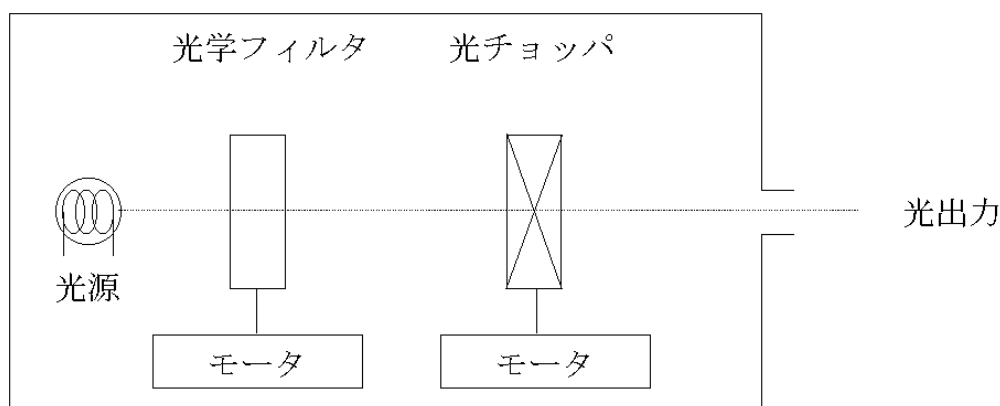



図 4.3.1　白色光源装置の概略図

Ｂ　光スペクトラムアナライザ装置

コア径 5～10 μm のシングルモード光ファイバから、コア径 800 μm の大口径の光ファイバまで任意のコア径を光入力に使用することができる。計測波長範囲は 350nm～1750nm までの光スペクトラム分析が可能である。

入射光は、図 4.3.2 に示すようなモノクロメータの構成で出射スリットに送られる。コリメートミラーにより平行な光線となり、グレーティングに入射される。グレーティングは平面ミラーの表面に無数の溝が刻んである素子で、光を波長によって違った角度に反射するという特徴を持っている。そこで、特性方向に反射した光のみを受光するようにフォーカミングミラーを配置し、フォーカミングミラーの反射光が焦点を結ぶ位置に出射スリットを配置する。するとスリットによって特定の波長成分のみを取り出すことができる。本器ではコリメートミラーおよびフォーカミングミラーには軸はずし放物面鏡を使い、収差を抑える。さらに入力部に偏光解消素子を内蔵させ入力光無偏波状態に変換することで、偏波依存性を少なくする特徴である[2)]。

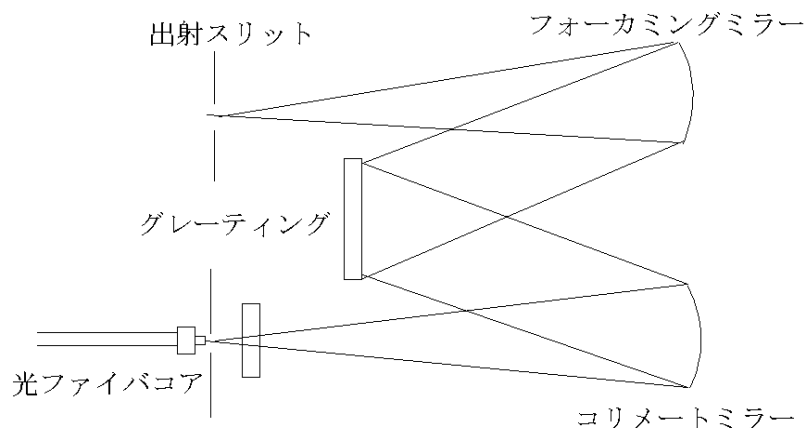



図 4.3.2　モノクロメータの基本構成

図 4.3.3 に回路構成図を示す。コネクタから入射された光より、モノクロメータで測定する波長成分のみが取り出される。受光部より電気信号に変換される。さらに、増幅回路により、A/D 変換に適したレベルまで増幅される。増幅された信号は A/D 変換回路によりデジタル信号に変換される。

増幅回路ゲインは、基準レベルの設定より最適な値が選ばれる。さらに測定感度が HIGH1～3 の時は、入力レベルに追従して自動ゲイン調整を行うことでダイナミックレンジを拡大している。制御回路は 32bit CPU と 16bit CPU の計 2 個から構成され、制御キー入力、GP-IB ボード、表示器そしてプリンタを制御し CPU2 はモノクロメータ受光部、増幅回路および A/D 変換回路を制御している [2]。

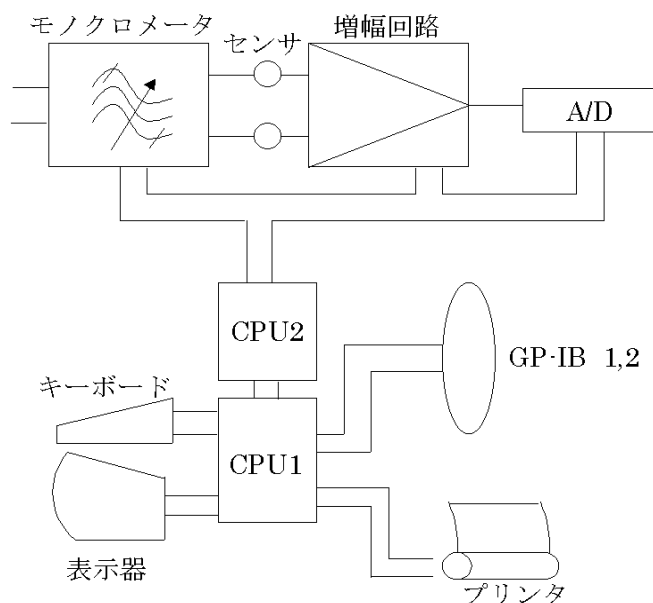



図 4.3.3　光スペクトラムアナライザ回路構成図

C　試験結果

Ag 膜を成膜させたものを図 4.3.4 に示す実験方法で測定を行った。Ag は SPR 励起に用いられる代表的な金属であり、誘電率（屈折率）の虚数部の値が小さく、観測される信号がより鮮明に得られる性質がある [3]。図 4.3.5 はグリセリン溶液濃度変化の試験結果である。濃度が高くなると共鳴ピークの長波長側へのシフトが見られた。

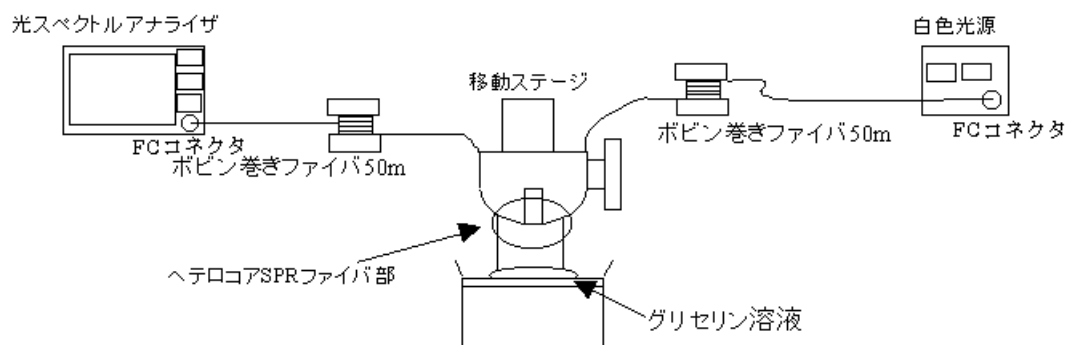



図 4.3.4　実験概念図

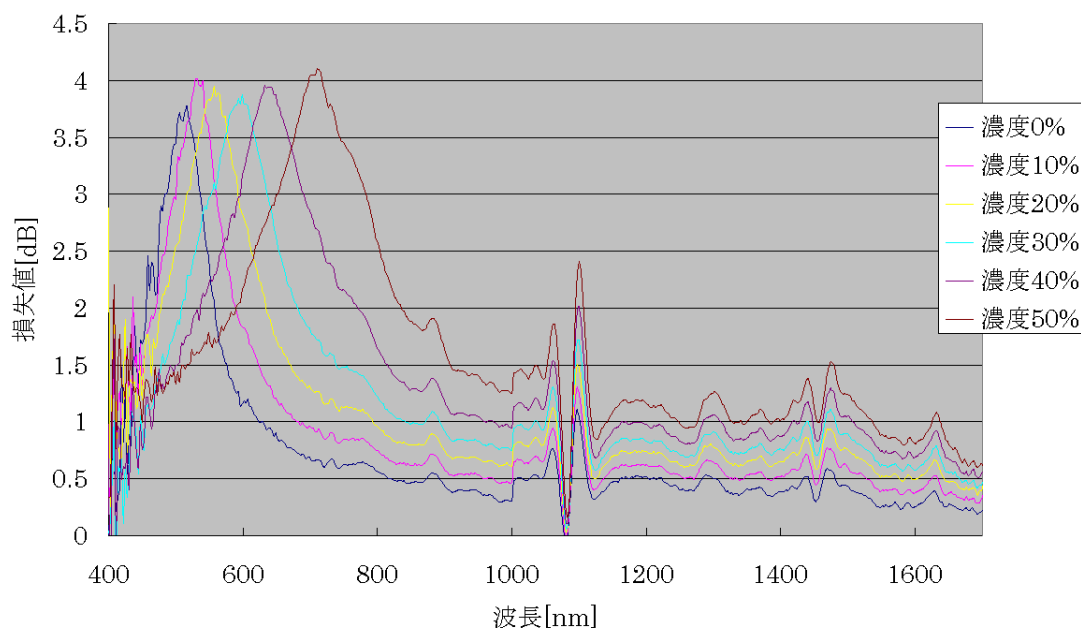



図4.3.5 グリセリン溶液濃度変化試験(ヘテロコア部Ag薄膜使用)

参考文献

1）安藤電気株式会社：AQ-4303B 白色光源　取扱説明書

2）安藤電気株式会社：AQ-6315A/B　光スペクトラムアナライザ　取扱説明書

3）渡辺一弘、伊賀光博、関　篤志：検査技術 2002.6.

４．４　Au 薄膜、膜厚変化による表面プラズモン共鳴に関する研究

表面プラズモンは光により励起されるものであり、入射光のエネルギーは励起に使われて反射光が減少する。自由電子の非放射性表面プラズモンポラリトンの励起を伴う電磁波は、金属表面において振幅が最大となる p-偏光波である。これは、表面化学種の測定原理に適している。また、励起は透明な吸着種の存在によっても共鳴条件は敏感に変化する。この特徴を利用して金属薄膜や表面化学種の光学定数を精密に測定することが行われている。

以下では、ヘテロコア光ファイバ部に金属薄膜を成膜させる成膜条件、LED 光源波長選択の決定を目的に、ヘテロコア光ファイバでの表面プラズモン共鳴特性の検討を行う。

Ａ　金属、膜厚変化に対する表面プラズモン共鳴特性

金属薄膜の膜厚が薄いと共鳴ピークは広がり、厚くなるとピーク自体が浅くなる。膜厚が薄いときは、表面プラズモンとして金属表面を伝搬する以前に全反射光に変換されてしまうのでピークがぼける。一方厚いと入射光が表面プラズモンを励起できなくなりピークが浅くなる。最適な膜厚は 50nm 程度である。[1)]

プラズモンのエネルギーは、ほとんどの金属で紫外線のエネルギー領域にある。しかし、Ag、Au、アルカリ金属およびその他の二、三の例では、プラズモンのエネルギーは小さくて可視光あるいは近紫外線のエネルギーに対応しており、光によってプラズモンを励起することも可能である。

Ｂ　ヘテロコア光ファイバ表面プラズモン共鳴による屈折率測定問題点

屈折率測定は、光の出力変化、レーリ散乱光変化を屈折率値に直して読み取るものである。屈折率（溶液濃度）が変化すると、共鳴ピークが長波長または短波長へとシフトする。共鳴ピークの広がり具合などは、金属の種類、膜厚に依存する。膜厚変化に対するプロセスパラメータは、以下の 2 つである。

(1)　スパッタ電力［W］

(2)　成膜時間［sec］

表面プラズモン共鳴に最も適した金属は Ag である。しかし、Ag は表面が酸化されやすく、成膜から数時間で共鳴特性が大きく変化するため、センサに用いるには不適である。

表面プラズモン共鳴は、Ag の他は Au が可視～近赤外でシャープな共鳴ピークを示し耐食性にも優れた金属である。

屈折率センサには、光源に LED を用いることが最適であると考えられる。しかし、一般的な LED 光源波長での屈折率に対する出力変化は小さい。膜厚変化での屈折率に対する出力変化は大きなものではない。

C　実験方法

図 4.4.1 は実験方法の概略図を、図 4.4.2 にはヘテロコアセンシング部の写真をそれぞれ示す。光源に白色光源を使用し、計測器に光スペクトラムアナライザを用いた。白色光源、光スペクトラムアナライザのコネクタは FC コネクタであるため、一度両端 FC コネクタ付きファイバを接続させ、その後 FC-SC 変換アダプタにより SC コネクタ付きヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバを取り付け測定した。

光スペクトルアナライザ（安藤電気㈱AQ-6312A）
白色光源（安藤電気㈱AQ-4303B）
XYステージ
FCコネクタ
SC-FC変換アダプタ
SC-FC変換アダプタ
FCコネクタ
ヘテロコアSPRファイバ部
グリセリン溶液

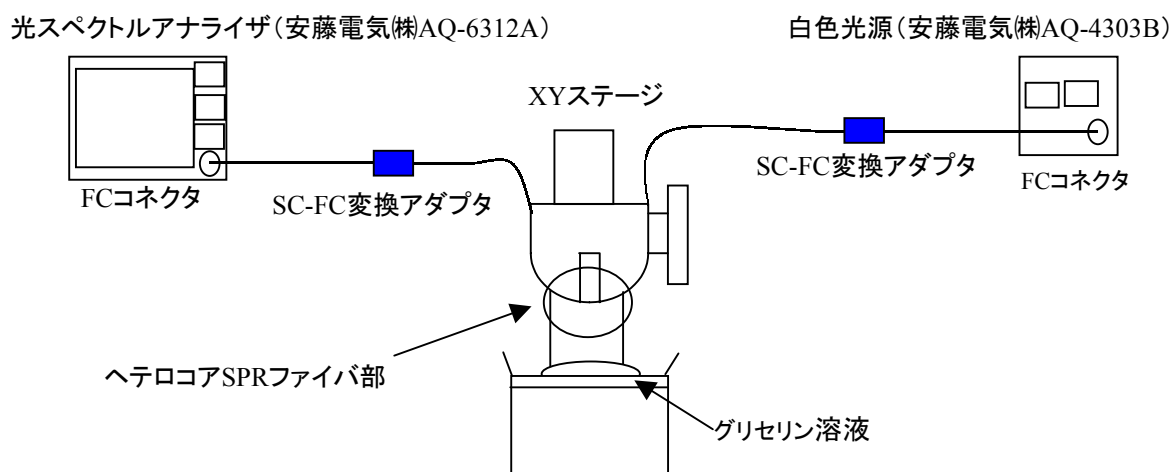



図 4.4.1　実験概念図

図 4.4.2　ヘテロコアセンシング部

測定波長範囲は、400nm～1750nm の紫外線から赤外線領域である。今回用いた白色光源の出力レベル安定度は±0.05dB。光スペクトラムアナライザのレベル確度は±0.3dB であり、計測器での誤差は、±0.35dB である。表 4.4.1 に測定器の実験条件を示した。

表 4.4.1　測定機器の実験条件

品　名	条　件
白色光源 （安藤電気 AQ-4303B）	波長範囲：400nm～1800nm 出力レベル安定度：±0.05dB 以内（20℃1 時間） 発光素子：ハロゲンランプ
光スペクトラムアナライザ （安藤電気 AQ-6312A）	波長範囲：400nm～1750nm レベル確度：±0.3dB（25±5℃） 波長確度：±1nm

D　測定原理

光ファイバ内を伝送されてきた光は、ヘテロコア部に入射すると、相当量の光がクラッド部に広がる。クラッド部では、クラッディングモードとしてファイバの外境界面で光の反射が行われるようになる。クラッド外境界面 Au 薄膜により、表面プラズモン現象が励起される。

反射される光のうち、測定試料の特性に依存した所定の入射角度の光が、表面プラズモン現象の励起に使われて光が減少する。光の強度変化は、光スペクトラムアナライザにおいて伝搬された光の波長に対する損失の度合いを求める。この度合いにより試料の屈折率を求める。プラズモンセンサ構造の概念図を図 4.4.3 に示した。

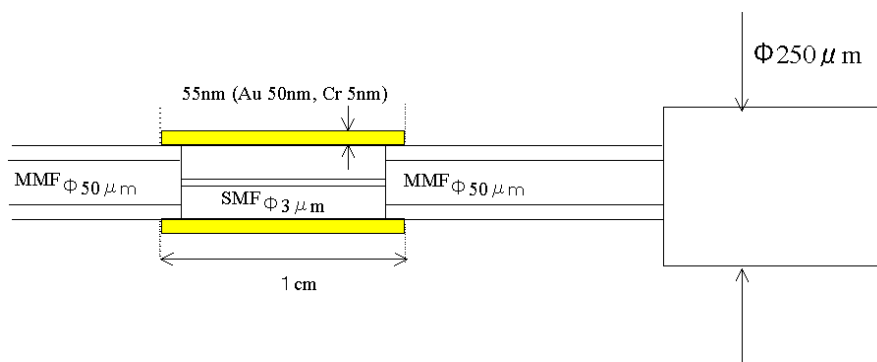



図 4.4.3　プラズモンセンサ構造

E　実験結果

図 4.4.4～図 4.4.7 には、グリセリン溶液濃度を変化させたときの損失値変化を示している。図 4.4.4 には No.1 センサ（成膜条件：Cr50[W]100[sec],Au50[W]200[sec]）、図 4.4.5 は No.2 センサ（成膜条件：Cr50[W]100[sec],Au50[W]400[sec]）、図 4.4.6　No.3 センサ（成膜条件：Cr50[W]100[sec],Au50[W]700[sec]）、図 4.4.7　No.4 センサ（成膜条件：Cr50[W]100[sec],Au25[W]400[sec]）の特性を示している。

図 4.4.4～図 4.4.6 までを比較すると、図 4.4.5　No.2 ファイバセンサは鮮明な共鳴ピークシフトが見られた。Au 薄膜の膜厚を変化させると共鳴ピークが変化した。図 4.4.4 のような膜厚が薄い時は、表面プラズモンを共鳴させても金属表面を伝搬する以前に全反射光に変換されピークがぼける。図 4.4.6 のように、膜厚が厚い場合には、入射光が表面プラズモンを励起できなくなりピークが浅くなった。表面プラズモンを励起させるための最適成膜条件は No.2 ファイバセンサであることが確認できる。図 4.4.7 には参考のため、Au 成膜時間を同じにして、スパッタ電力を変化させた。図 4.4.5 に比べると、膜厚が薄くなったため、共鳴ピークは広がった。

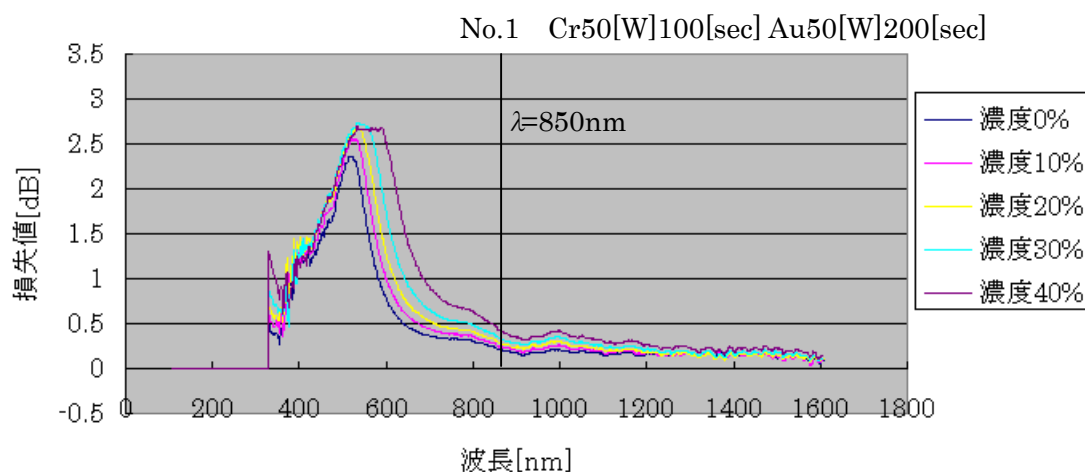



図4.4.4　ヘテロコアAu薄膜SPRファイバセンサ(No.1)特性

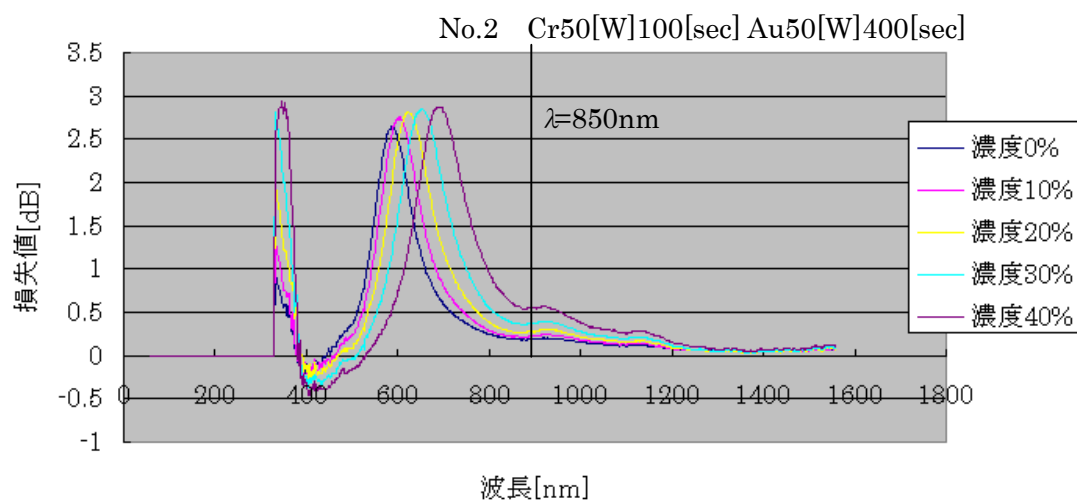



図4.4.5. ヘテロコアAu薄膜SPRファイバセンサ(No.2)特性

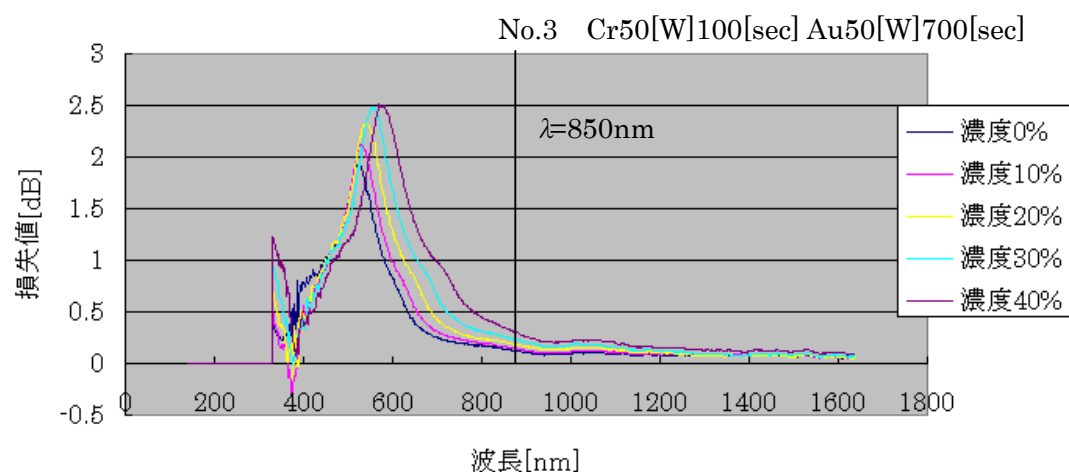



図4.4.6. ヘテロコアAu薄膜SPRファイバセンサ(No.3)特性

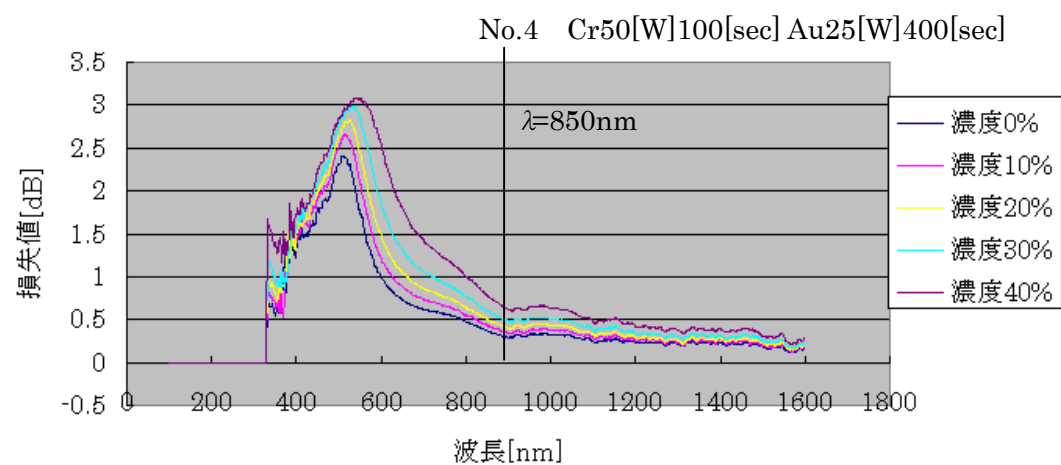



図4.4.7　ヘテロコアAu薄膜SPRファイバセンサ(No.4)特性

さらに応用的な実験として、波長 850nm におけるグリセリン溶液濃度変化に対する損失値変化を観測した。小型化を考慮すると LED 光源を用いるのが適している。一般的な LED 光源の波長は 850nm、1330nm、1550nm である。図 4.4.4～図 4.4.7 より、共鳴ピークは 500nm～700nm の間で現れる。濃度変化に対して損失値が大きくなるのは、上記の波長の中では 850nm である。そこで、測定波長に 850nm を選択した。

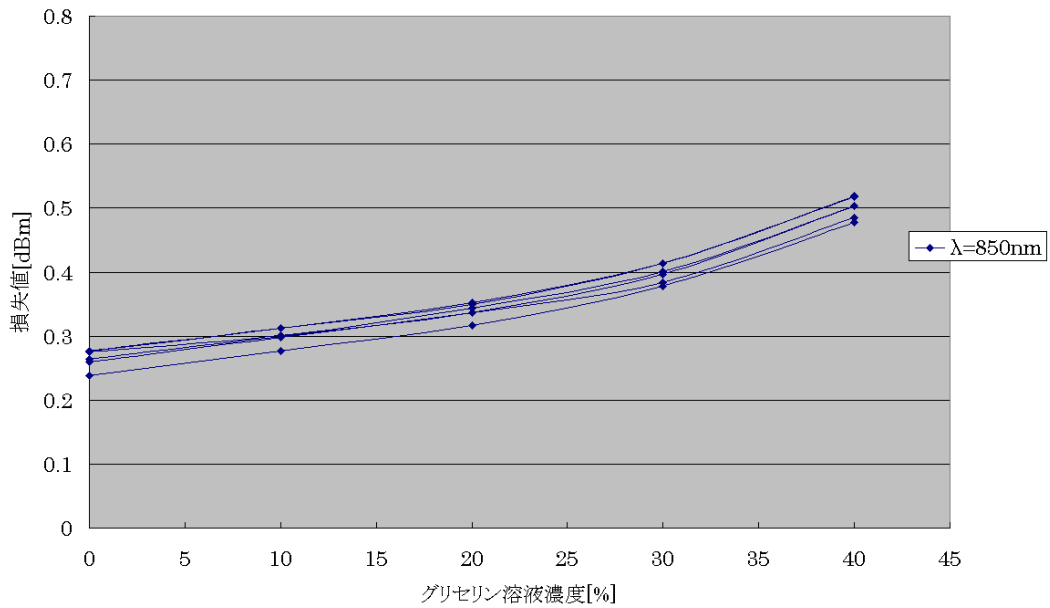



図4.4.8 λ=850nm No.1ファイバ グリセリン溶液濃度変化試験

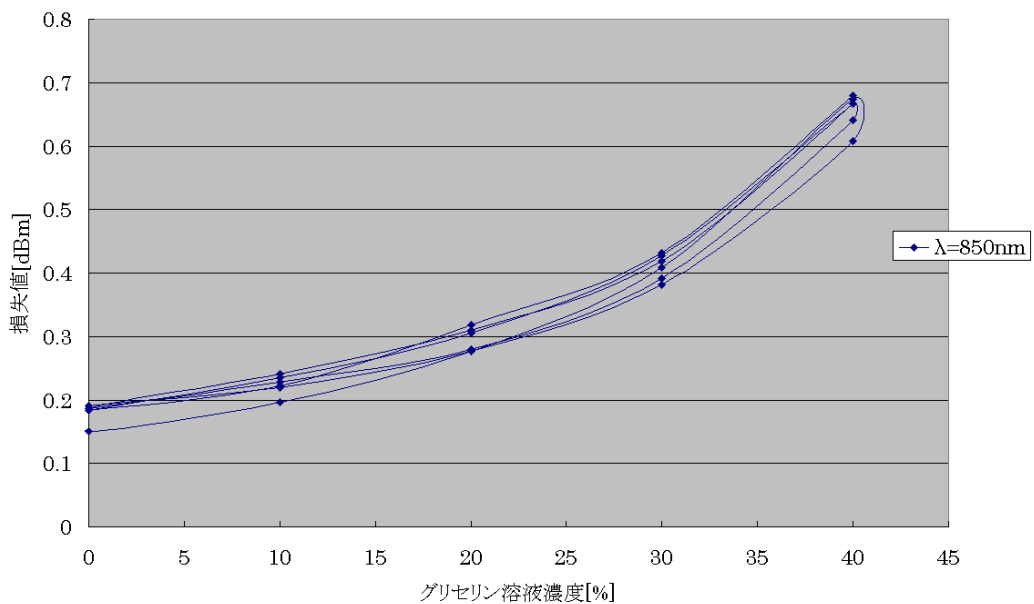



図4.4.9 λ=850nm No.2ファイバ グリセリン溶液浸漬試験

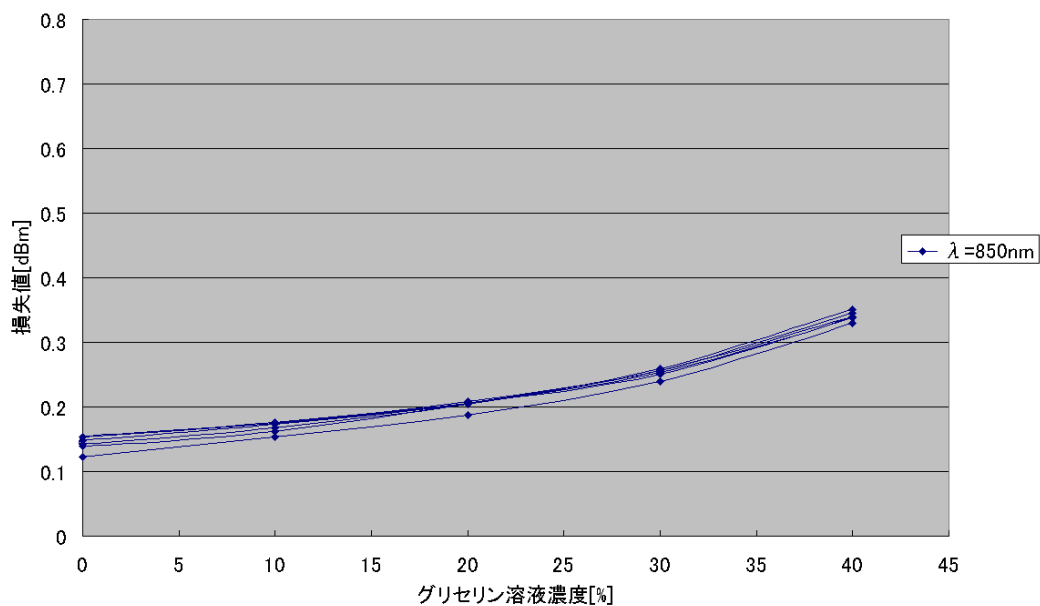



図4.4.10 λ=850nm No.3ファイバ グリセリン溶液浸漬試験

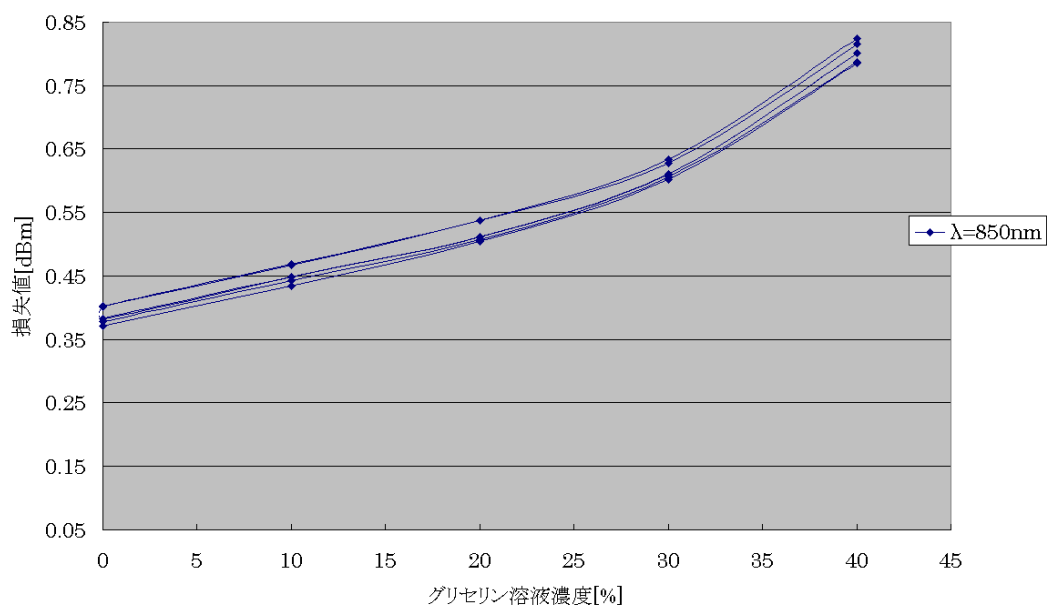



図4.4.11 λ=850nm No.4ファイバ グリセリン溶液濃度変化試験

各々の測定結果は、図 4.4.8 No.1 ファイバの変化幅は 0.236dBm となった。図 4.4.9 No.2 ファイバの変化幅は 0.476dBm。図 4.4.10 No.3 ファイバ変化幅、0.197dBm。図 4.4.11 No.4 ファイバ変化幅、0.416dBm である。これから、グリセリン溶液濃度変化に対する損失値変化が大きくなるのは、No.2 ファイバであることがわかった。

表 4.4.2～表 4.4.6 には測定結果の平均値、標準偏差、%FS、N%FS（屈折率）の計算結果をまとめた。表 4.4.2 は No.1 ファイバ、表 4.4.3 No.2 ファイバ、表 4.4.4 No.3 フ

ァイバ、表 4.4.5　No.4 ファイバの計算結果である。

上記の測定結果から、グリセリン溶液濃度変化に対する損失値変化が大きくなるのは、No.2 ファイバであることがわかったが、表 4.4.2～表 4.4.5 より、損失値変化が大きくなったとしても、標準偏差、%FS、N%FS 値の向上は見られなかった。これは、計測器誤差±0.35dB の影響を強く受けているものと考えられる。

表 4.4.2　λ=850nm　No.1 ファイバ特性

	濃度 0%	濃度 10%	濃度 20%	濃度 30%	濃度 40%
MAX	0.277 dBm	0.313 dBm	0.352 dBm	0.414 dBm	0.519 dBm
MIN	0.238 dBm	0.277 dBm	0.317 dBm	0.378 dBm	0.478 dBm
Average	0.265 dBm	0.300 dBm	0.339 dBm	0.398 dBm	0.501 dBm
SD（標準偏差）	0.014 dBm	0.012 dBm	0.012 dBm	0.014 dBm	0.015 dBm
%FS	5.789 %	5.111 %	4.917 %	5.791 %	6.422 %
N%FS	0.0023	0.0020	0.0020	0.0023	0.026

表 4.4.3　λ=850nm　No.2 ファイバ特性

	濃度 0%	濃度 10%	濃度 20%	濃度 30%	濃度 40%
MAX	0.191 dBm	0.235 dBm	0.318 dBm	0.432 dBm	0.680 dBm
MIN	0.150 dBm	0.196 dBm	0.276 dBm	0.382 dBm	0.608 dBm
Average	0.180 dBm	0.224 dBm	0.294 dBm	0.410 dBm	0.656 dBm
SD（標準偏差）	0.014 dBm	0.014 dBm	0.017 dBm	0.018 dBm	0.025 dBm
%FS	2.869 %	3.018 %	3.601 %	3.788 %	5.168 %
N%FS	0.0011	0.0012	0.0014	0.0015	0.0021

表 4.4.4　λ=850nm　No.3 ファイバ特性

	濃度 0%	濃度 10%	濃度 20%	濃度 30%	濃度 40%
MAX	0.153 dBm	0.176 dBm	0.208 dBm	0.259 dBm	0.351 dBm
MIN	0.122 dBm	0.154 dBm	0.188 dBm	0.239 dBm	0.330 dBm
Average	0.143 dBm	0.168 dBm	0.203 dBm	0.253 dBm	0.340 dBm
SD（標準偏差）	0.011 dBm	0.008 dBm	0.007 dBm	0.007 dBm	0.006 dBm
%FS	5.379 %	3.908 %	3.417 %	3.392 %	3.280 %
N%FS	0.0022	0.0016	0.0014	0.0014	0.0013

表 4.4.5　λ=850nm　No.4 ファイバ特性

	濃度 0%	濃度 10%	濃度 20%	濃度 30%	濃度 40%
MAX	0.403 dBm	0.469 dBm	0.538 dBm	0.634 dBm	0.824 dBm
MIN	0.371 dBm	0.434 dBm	0.505 dBm	0.602 dBm	0.785 dBm
Average	0.386 dBm	0.452 dBm	0.518 dBm	0.615 dBm	0.802 dBm
SD（標準偏差）	0.012 dBm	0.012 dBm	0.014 dBm	0.012 dBm	0.014 dBm
%FS	2.810%	3.005%	3.383%	2.796%	3.356%
N%FS	0.0011	0.0012	0.0014	0.0011	0.0013

以上の結果、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサの膜厚を変化させ、グリセリン溶液濃度変化試験を行った。この結果は、膜厚変化に対して、特に測定精度が向上する結果とはならなかった。しかし、濃度変化に対する損失値変化が大きかった No.2 ファイバが最適成膜条件であると考えられた。

計測器の測定誤差は±0.35dB である。No.2 ファイバのグリセリン溶液濃度 0%～40%での変化幅は、0.476dBm であるため、計測器誤差の影響を大きく受けていることが考えられた。そこで、次に計測器誤差の小さい、LED850nm 光源、光マルチメータを使用してグリセリン溶液濃度変化試験を行った。

参考文献

1) 永田和弘、半田　宏共著：生体物質相互作用のリアルタイム解析実験法　シュプリガー・フェアラーク東京
2) 青山友紀：T.IEE Japan,Vol.122-C,No4,2000
3) 鈴木扇太：T.IEE Japan,Vol.122-C,No4,2000
4) 山下育男、宍田浩彦、青海恵之：T.IEE Japan,Vol.122-C,No4,2000

４．５　LED085 光源、光マルチメータによるグリセリン溶液濃度変化試験

ハロゲンランプを使用している白色光源は、熱による出力変化が生じる。また光スペクトラムアナライザは、モノクロメータで光学部品を経由するため、光学部品の誤差総和が大きく、さらに部品を駆動させるステッピングモータの停止誤差も大きな要因である。

精度の良い屈折率の測定を行うには、光源の安定度、測定器のレベル確度をできるかぎり小さくする必要がある。

そこで本法では、APC（Automatic Power Control）および温度センサを取りつけた LED085 光源を用いた。計測器には、光学部品を経由しないフォトダイオードに直接光を照射する光マルチメータによる測定を試みた。測定に用いたヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバは、濃度変化に対して損失値変化の大きい No.2 ファイバを用いた。

Ａ　LED085 光源装置

光出力レベル安定度を向上させるため、温度補正回路、LED 駆動部が設けられている。温度補正回路は、サーミスタで LED の温度を検出し、温度変動に対する光出力の変動を補正する。また、LED 駆動部では、駆動電流のフィードバックにより光出力を安定させている。図 4.5.1 に、LED ユニットのブロックダイヤグラムを示した。

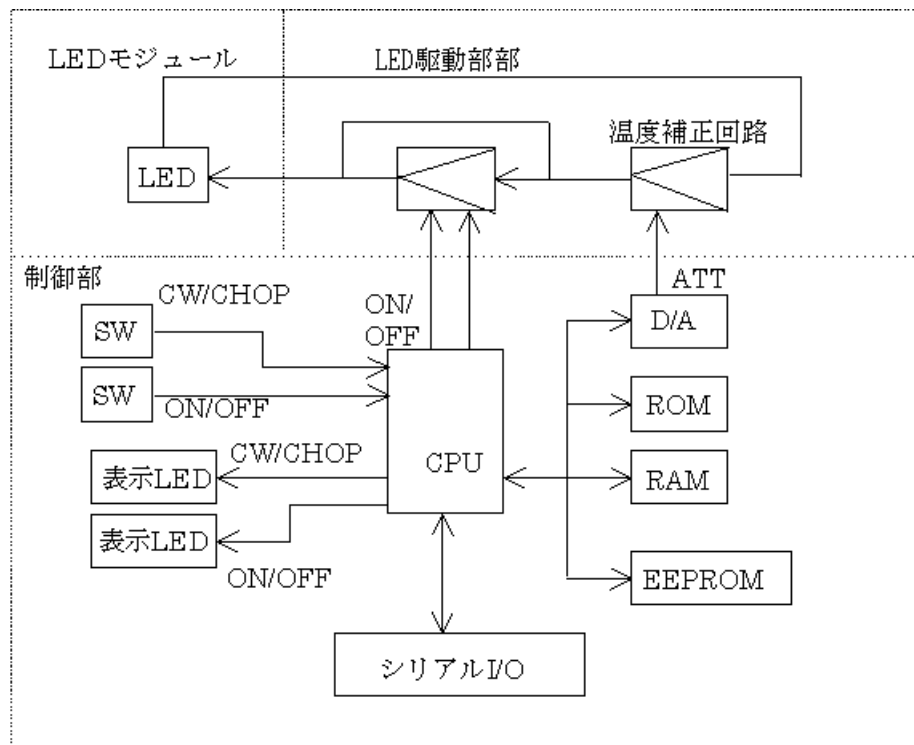



図4.5.1　光源ユニット主要回路構成図

B　光マルチメータ装置

プラグインユニットの交換ができる汎用コントローラが、光マルチメータである。このユニットに OPM ユニットを接続させ、その先にセンサを取り付けて入射光を出力する。

センサ部は、PD モジュール、EEPROM、ボリュームで構成されている。PD モジュールは、ペルチェ内蔵型 Ge フォトダイオードを用いており入射光に比例した電気信号を出力する。また、センサの波長感度特性を補正するための EEPROM が内蔵されている。さらに絶対値調整用のボリュームも設置されている。

OPM ユニットでは、可変利得増幅部、ゼロセット部が設けてある。可変利得増幅部は、オペアンプ、アクティブ LPF、アクティブ BPF、検波回路から構成されており、入射パワーに応じて利得の切換えを行う。また、ゼロセット部では、回路内の電気的なオフセットを D/A 変換回路からの出力で打ち消す。D/A 変換回路からの出力は、ZERO キーが押されゼロセットを実行したときに決定し、再度ゼロセットを実行するまでその値を保持する。

図 4.5.2 にはブロックダイヤグラムを示した。

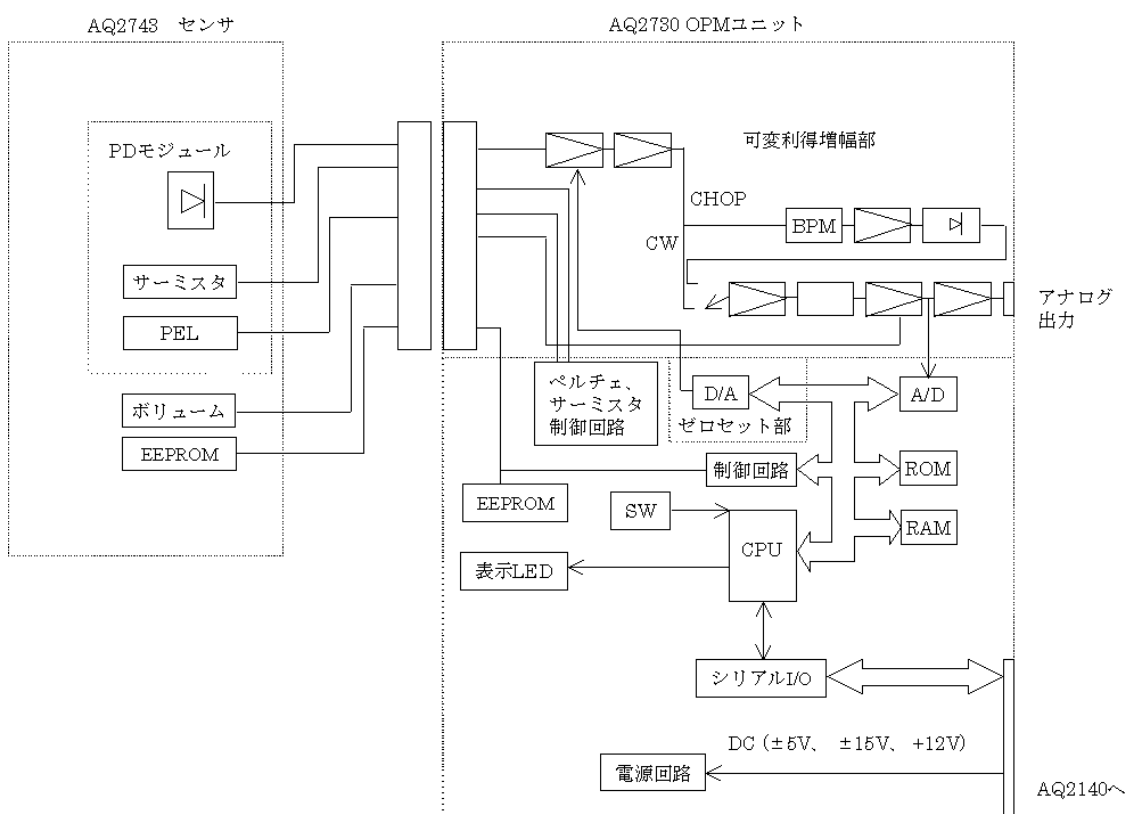



図 4.5.2　センサ、OPM ユニット　ブロックダイヤグラム

C　実験方法

図 4.5.3 に、LED085 光源、光マルチメータ測定による実験概念図を示した。LED 光源のコネクタは SC コネクタである。しかし、センサのコネクタは FC コネクタであるため、両端 FC コネクタ付きファイバを接続させ、その後 FC-SC 変換アダプタにより SC コネクタ付きヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバを取りつけた。

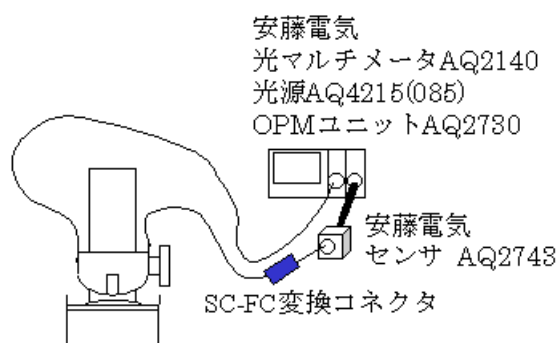



図 4.5.3　実験概念図

LED085 光源の出力レベル安定度は±0.005dB。光マルチメータによるレベル確度は±0.01dB である。計測器での誤差は、±0.015dB である。これは、白色光源、光スペクトラムアナライザでの計測器誤差±0.35dB より優れていることがわかる。表 4.5.1 に LED085 光源、光マルチメータの仕様を示す。

表 4.5.1　LED085 光源、光マルチメータ仕様

品　名	仕　様
LED085 光源 （安藤電気　AQ4215（085））	波長：850nm±15 出力レベル安定度：±0.005dB 注) （注：5 分間、温度一定 20～30℃内の 1 点）
光マルチメータ （OPM ユニット、センサ接続時） （安藤電気　AQ2140：光マルチ、 AQ2730：OPM、AQ2743：センサ）	波長範囲：700nm～1800nm 基準条件における不確定さ：±0.01dB

D　実験結果

図 4.5.4 に、No.2 ファイバを使用したときの測定結果を示した。グリセリン溶液濃度 0%-40%、40%-0%の往復試験を行い、この時の dBm 値の変化を示している。測定時の室温は 23℃～24℃。損失値変化は、約 0.28dBm～0.99dBm であり変化幅は 0.71dBm であった。参考のため白色光源、光スペクトラムアナライザによる結果も示した。これにより、LED085 光源、光マルチメータを使用した方が、測定精度は高いことが確認できる。表 4.5.2 には測定結果の平均値、標準偏差、%FS、N%FS の計算結果をまとめた。

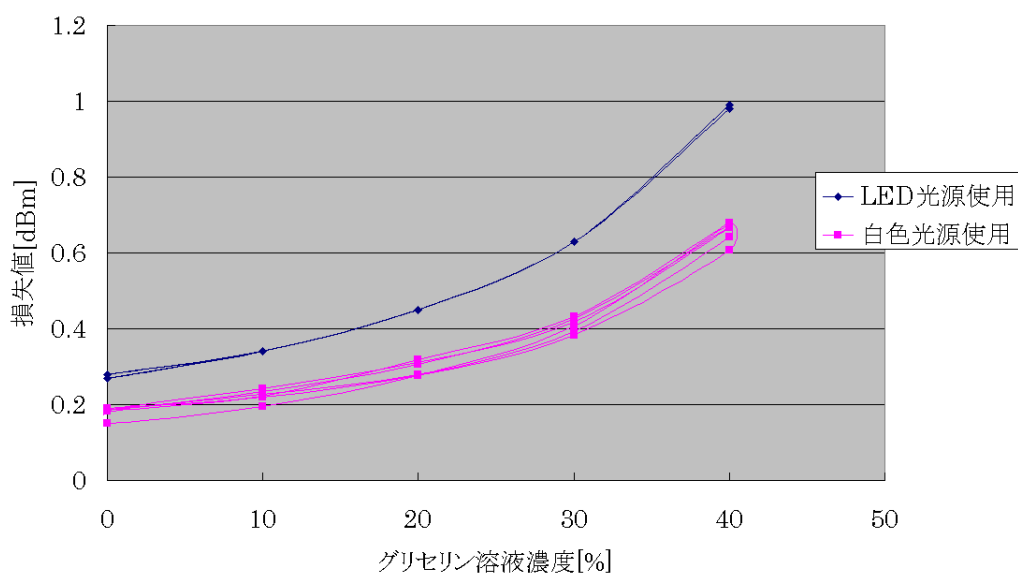



図4.5.4　ヘテロコアAu薄膜SPRファイバセンサ　グリセリン溶液濃度変化試験

表 4.5.2　No.2 ファイバ LED085 光源、光マルチメータ使用グリセリン溶液浸漬往復試験

No.2：Cr50[W]100[sec]、Au50[W]400[sec]

	濃度 0%	濃度 10%	濃度 20%	濃度 30%	濃度 40%
MAX	0.28 dBm	0.34 dBm	0.45 dBm	0.63 dBm	0.99 dBm
MIN	0.27 dBm	0.34 dBm	0.45 dBm	0.63 dBm	0.98 dBm
Average	0.28 dBm	0.34 dBm	0.45 dBm	0.63 dBm	0.99 dBm
SD（標準偏差）	0.005 dBm	0.000 dBm	0.000 dBm	0.000 dBm	0.004 dBm
%FS	0.701　%	-	-	-	0.522%
N%FS	0.0003	-	-	-	0.0002

Ｅ　グリセリン溶液蒸発試験

No.2 ファイバの LED085 光源、光マルチメータによる分解能を調べるため、グリセリン溶液にファイバを浸漬させたまま、溶液を蒸発させて濃度を変化させた“グリセリン溶液浸漬蒸発試験”を試みた。濃度 40%、30%、20%、10%、0%の結果を図 4.5.6～図 4.5.10 に示した。40%、30%蒸発試験は、ほぼ一直線状の結果が得られ、濃度変化を検知できた。しかし、20%以下の溶液では計測器誤差の影響を受けた結果となった。

表 4.5.3、表 4.5.4 には、図 4.5.4（LED 光源使用）のデータから求めた。濃度 40%、30%蒸発試験時の濃度変化、屈折率変化の計算結果を示した。

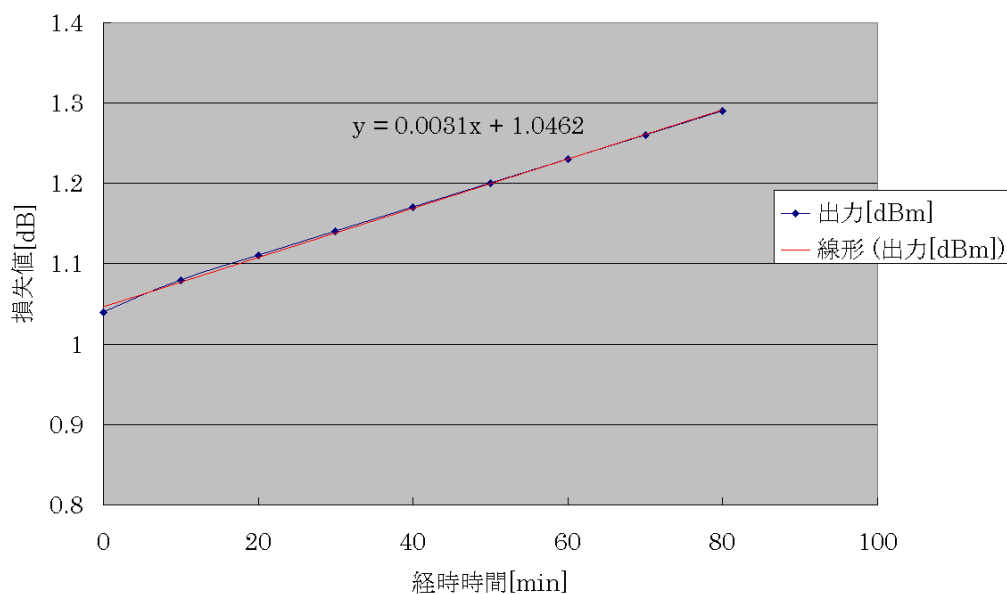



図4.5.6　グリセリン溶液40%蒸発試験　No.2ファイバ使用

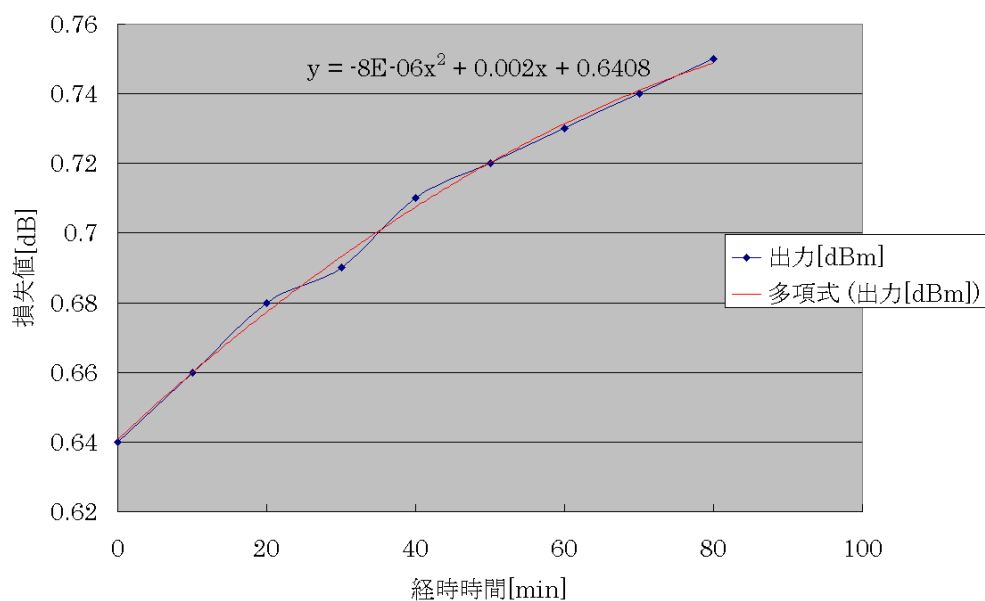



図4.5.7　グリセリン溶液30%蒸発試験　No.2ファイバ使用

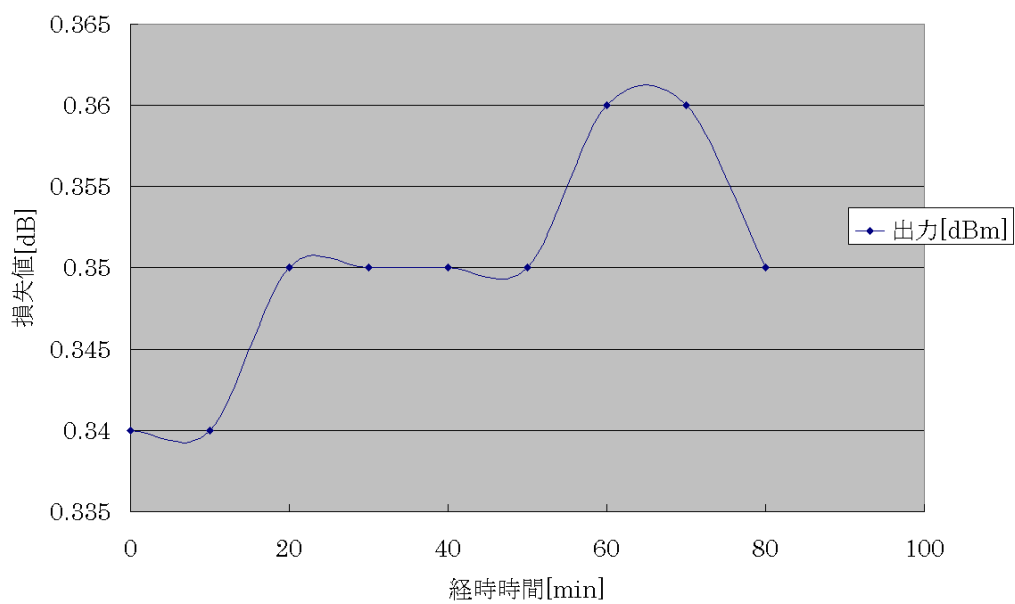



図4.5.8　グリセリン溶液20%蒸発試験　No.2ファイバ

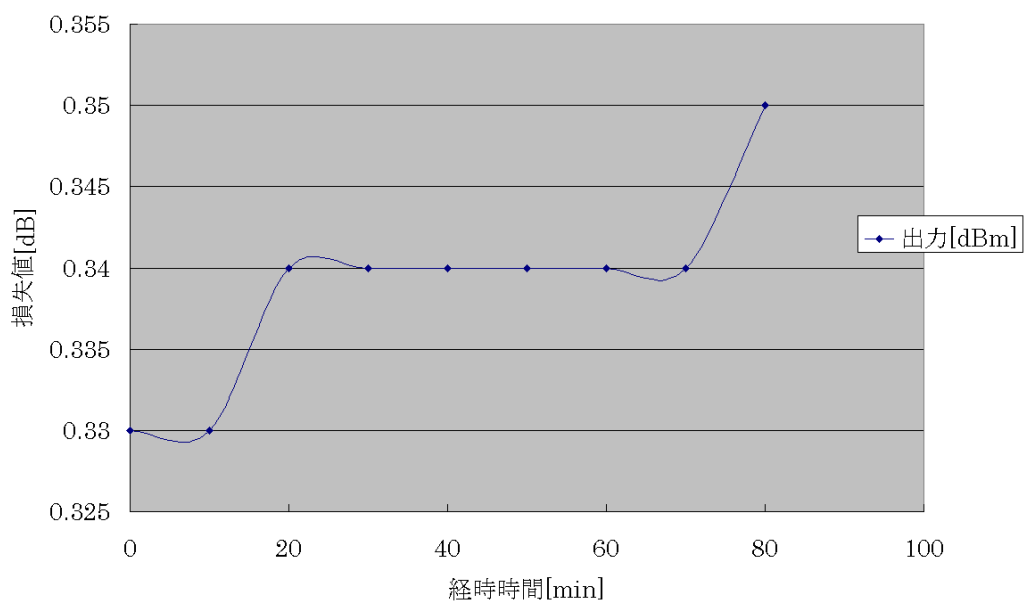



図4.5.9　グリセリン溶液10%蒸発試験　No.2ファイバ

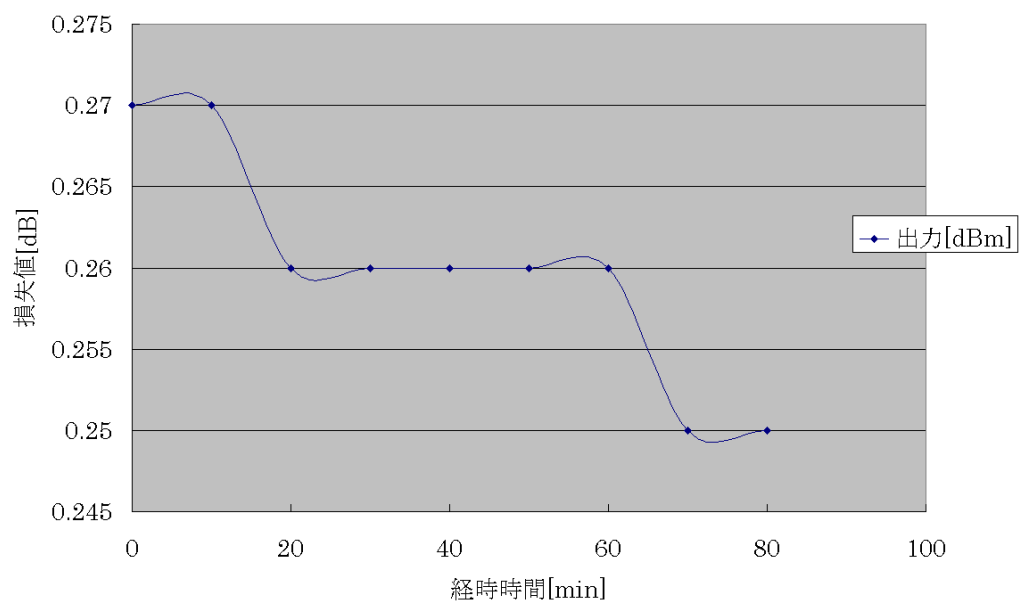



図4.5.10 グリセリン溶液0%蒸発試験 No.2ファイバ

表 4.5.3 No.2 ファイアバ グリセリン溶液 40%蒸発試験結果

経時時間 [min]	計測算出値 [dBm]	計測濃度 [%]	濃度変化量 [%]	計測屈折率	屈折率変化量
0	1.04	39.6		1.3822	
10	1.08	40.7	1.1	1.3836	0.0014
20	1.11	41.4	0.7	1.3845	0.0009
30	1.14	42.2	1.0	1.3856	0.0011
40	1.17	43.0	0.8	1.3866	0.0010
50	1.20	43.8	0.8	1.3876	0.0010
60	1.23	44.5	0.7	1.3886	0.0010
70	1.26	45.3	0.8	1.3896	0.0010
80	1.29	46.1	0.8	1.3906	0.0010

表 4.5.4　No.2 ファイバ　グリセリン溶液 30%蒸発試験結果

経時時間 [min]	計測算出値 [dBm]	計測濃度 [%]	濃度変化量 [%]	計測屈折率	屈折率変化量
0	0.64	28.6		1.3679	
10	0.66	29.6	1.0	1.3692	0.0013
20	0.68	30.4	0.8	1.3702	0.0010
30	0.69	30.6	0.2	1.3705	0.0003
40	0.71	31.1	0.5	1.3711	0.0006
50	0.72	31.4	0.3	1.3715	0.0004
60	0.73	31.6	0.2	1.3718	0.0003
70	0.74	31.9	0.3	1.3722	0.0004
80	0.75	32.2	0.3	1.3726	0.0004

以上により、LED085 光源、光マルチメータを用いて、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサ（No.2）のグリセリン溶液濃度変化試験、溶液蒸発試験を行った。この結果、白色光源、光スペクトラムアナライザ測定に比べると、測定精度は向上した。表 4.5.3、4.5.4 から、最小濃度表示 0.2%、最小屈折率表示 0.0003。測定精度はそれぞれ±0.7%、±0.0003 であることがわかった。

さらに精度の高い測定に際しては、計測器の高性能化のほか、Au 薄膜の構造回折、表面粗さ等の検討が今後の課題である。

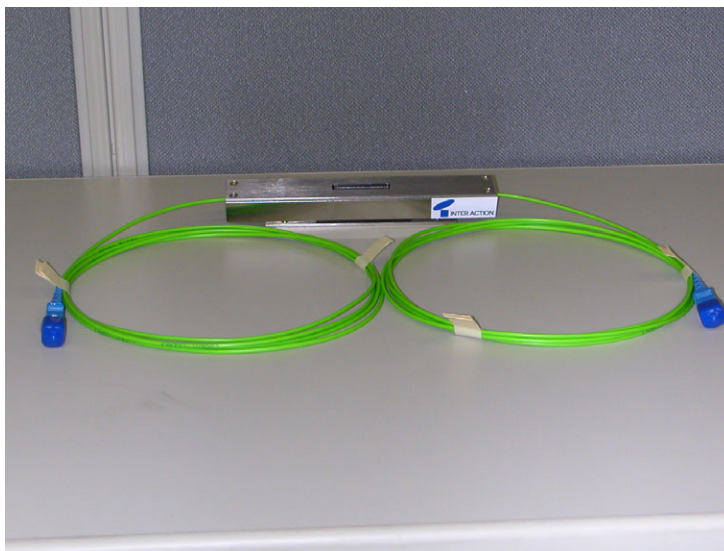
参考文献

1）安藤電気株式会社：AQ4215（085）　LED ユニット　取扱説明書
2）安藤電気株式会社：AQ2140 光マルチメータ　取扱説明書
3）安藤電気株式会社：AQ2730OPM ユニット　取扱説明書
4）安藤電気株式会社：AS-61821 AQ-9335（FC）コネクタアダプタ　取扱説明書
5）大越孝敬、岡本勝就、保立和夫：光ファイバ　オーム社
6）保立和夫：東京大学 21 世紀 COE「未来社会を担うエレクトロニクスの展開」第 1 回シンポジウム　P57-P66
7）岡本勝就：光導波路の基礎　コロナ社
8）大越孝敬：光ファイバ通信　岩波新書
9）河野健治、鬼頭　勉：光導波路解析の基礎　現代工学社

４．６　屈折率センサモジュールのプロトタイプ試作

グリセリン溶液濃度変化試験、浸漬蒸発試験などから、ヘテロコア SPR ファイバは形状に微小変化が起こると、測定値に大きな影響を与えることが考えられた。

そこで、試作品はファイバの破断を防ぎ、さらに溶液の浸漬に対して微小変化をしないようプロトタイプの設計を行った。図 4.6.1 には屈折率センサモジュールの外観の写真を示した。(a)には全体図、(b)にはモジュール拡大図を示した。構造概念図を図 4.6.2 に示した。

構造は 2 重構造であり、ファイバの固定を強化するため、まず図 4.6.2(a)のような 60×15×1[mm]のケースでファイバを固定し、この上に図 4.6.2(b)に示した 140×20×24[mm]のケースでカバーを付けるプロトタイプの形とした。これは、壁、円柱等に取り付けが可能である。

(a)　全体図

(b)　モジュール部拡大図

図 4.6.1　屈折率センサモジュール外観

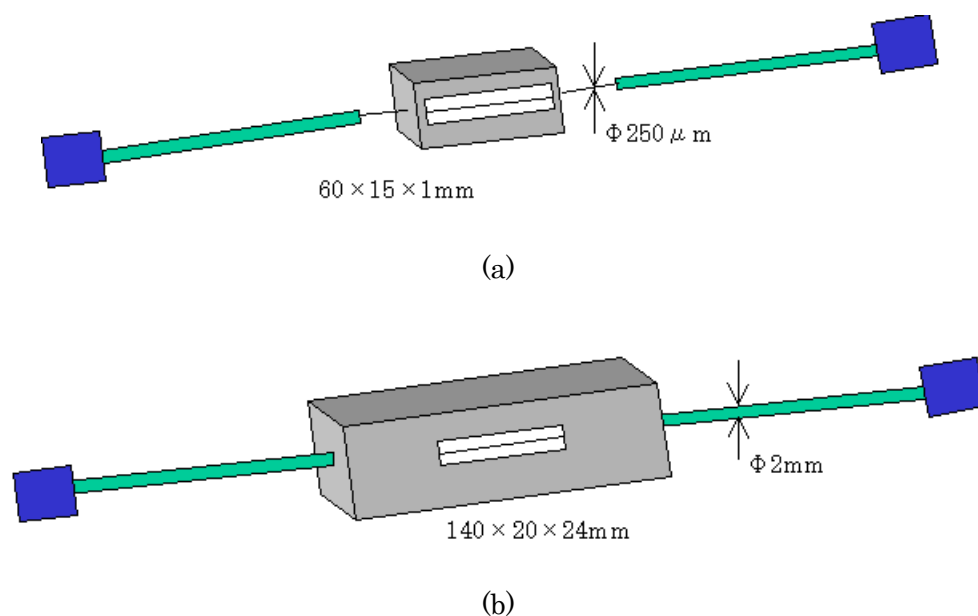



図 4.6.2　プロトタイプ構造図

表 4.6.1 に、本プロジェクトで試作した屈折率センサモジュールの仕様をまとめた。高性能タイプの性能にはおとるが、携帯用タイプの精度は上回った。

表 4.6.1　ヘテロコア SPR ファイバセンサ仕様

		ヘテロコア SPR ファイバセンサ	市販品 (ハンディタイプ)	市販品 (高性能タイプ)
測定範囲	屈折率	1.3303 ～ 1.3906	1.333 ～ 1.520	1.32200 ～ 1.36500
	濃度（Brix）	0.0% ～ 26.0%	1.4% ～ 90%	0.000% ～ 20.000%
最小表示	屈折率	0.0003	0.001	0.00001
	濃度（Brix）	0.1%	0.5%	0.005%
測定精度	屈折率	±0.0003	±0.001	±0.00006
	濃度（Brix）	±0.7%	±0.5%	±0.01%

４．７　まとめ

本章では、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサにおける、グリセリン溶液濃度変化に対する光出力変化を試みた。膜厚を変化させることにより、共鳴ピークの形状を変化させ、屈折率（濃度）変化に対して光出力変化が最も大きくなるような成膜条件を求めた。

また、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバの固定法を検討し、屈折率センサモジュールのプロトタイプ試作を行った。

具体的な成果は以下に示す。

A　白色光源、光スペクトラムアナライザを用いて、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバのグリセリン溶液濃度変化試験を行った。Au 薄膜の膜厚が薄いと、共鳴ピークがぼける。厚いとピークは浅くなった。共鳴ピークは波長 500nm～700nm の間で起こるため、LED 光源を用いた場合、波長 850nm が適当であることがわかった。これから、波長 850nm での屈折率（濃度）に対する、損失値変化が最も大きい Au 薄膜成膜条件は 50[W]400[sec]であることがわかった。なお、光ファイバのクラッド部はガラスであり、Au との密着性が弱く剥がれることが予想される。そこで、本法では最初に Cr 膜 50[W]100[sec]を成膜し、その上に Au 薄膜を成膜させた。

B　LED085 光源、光マルチメータによるグリセリン溶液濃度変化試験を行った。白色光源、光スペクトラムアナライザで測定したものと比べると、精度をかなり向上させることができた。これから、ヘテロコア Au 薄膜 SPR ファイバセンサの仕様は、最小濃度表示（Brix）0.1%、最小屈折率表示 0.0003。測定精度±0.7%（Brix）、±0.0003（屈折率）であることがわかった。

C　屈折率センサモジュールプロトタイプの試作を行った。センシングファイバの微小変化は、測定値に大きな影響を与える。そこで、センシングファイバを強固に固定するため、2 重構造でファイバを固定し、様々な場所に設置できるようなプロトタイプとした。

第５章　全体総括

ヘテロコアという名前は、コア径のことなる光ファイバの組み合わせというただ単に見た目の構造から名付けた。平成 9 年（1997)、大学の研究室で学生と実験を繰り返すうちに発明された。コア径の異なるファイバを組み合わせたという意味では既にいくつもの研究、特許が存在していた。例えば、コア径の異なる光ファイバを端面同士接触してつないだものは、光ファイバアッテネータや、モード変換器としてあった。しかしながら、微小長さのヘテロ部のガラス端面を融着器で融着接続したものがなかった。ただこれだけであったが、融着したことが大きな違いを生んだ。当時、あまりに簡単な発想だったのでどこかの誰かが必ずやっていると危惧しながら、恐る恐る特許を書き、薄氷を踏む気持ちで関係学会において発表してみた。結果的には、このような構造のものを、光センサとして考えたものは無く、平成 13 年 4 月（2002）に日本において特許が成立し、つづいて平成 14 年 9 月（2003）には米国でも特許査定がなされた。その後、これに関する応用特許を順次出願するはこびとなった。また、いくつもの学術論文、学会発表、国際会議論文として発表することになった。

ヘテロコア光ファイバセンサの実用化研究は主に創価大学工学部の渡辺一弘研究室でこつこつと進められると同時に、私が社外役員を務める株式会社インターアクションで将来の製品として市場調査をしながら少しづつインキュベートしてきた。このセンサの実用的価値と新規性をいち早く見出し、実用化すべきであると薦めてくれたのが、技術移転機構であるタマティーエルオー株式会社（TAMA-TLO）の井深丹社長であった。井深社長は、幅広い知識を有し、計測にも精通しておられたので種々の御示唆をいただいた。大学の研究室で私どもの試作品をみながら興味深そうにしていたと記憶している。ただ、きっとこんな簡単な構造のものはどこかにあるのではと、半信半疑だったかもしれない。私がこれを実用化したいと熱意を示したとき､開発のためのコンソーシアム形成に積極的に尽力し、推進してくれた。コンソ採択までは色々な曲折はあったものの、約 10 倍の競争を勝ち抜き、関東経済産業局平成 13 年度即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業に採択された。うれしかった。ヘテロコア光ファイバセンサによる水位計、成分計の開発と題し、ヘテロコア構造の光ファイバセンサを応用して、河川・ダム等の水位計測用の水位計及び液漏れ検知も可能な液体の屈折率計を開発することを目的とした。その結果は、研究概要に詳細に述べたとおり、横河電子機器（株）は水位計を、（株）インターアクションは成分計としての屈折率計の開発を行い、各々製品化が可能なプロトタイプの開発に成功し、研究目的をほぼ達成した。

大学の実験室レベルでは有用性を見出せても、製品化となると 1 段も 2 段もハードルが高くなる。再現性、精度、生産・量産効率性、コスト、耐久性等々、学術研究では必ずしも、真剣なる検討を行いにくい側面がある。暗黙知ともいうべき私のこれまでの経験からこういった製品開発研究のハードルはクリアできるという確信はあったものの、やって見

なければわからない、思わぬ伏兵もあるものである。しかしながら、コンソーシアムの資金と研究体制、導入機器のおかげで思った以上のセンサとしての性能を確保することが出来た。高性能融着器、スパッタ装置、リコータ、OTDR、各種光計測器等々の威力は開発の成否を左右したと言ってもよかった。大学のシーズは、TAMA-TLO を通じて、各企業へ２件の技術移転として生かされた。

コンソは１年という短期間であったが、各企業への技術移転作業、機器導入等に４ヶ月ほどかかってしまった。しかし、全員の熱意と、効率的な開発会議、綿密な連携で短期間のうちに開発を成功に導いた。年２回の運営会議、年３回の幹事会、年９回の開発会議では、技術の進捗、問題点の洗い出し、各分担の再確認・調整、IP 協定の内容協議、新たなる特許の策定、技術移転に伴う特許の契約内容、の多岐に渡り、TLO、企業研究者、大学教員、大学院学生（オブザーバ）が一体となって目標達成に向けて議論した。問題につきあたたる都度、大学から各企業に各種の情報、バックアップデータの提供、バックアップ実験の実施を行い、円滑なる開発作業が進められた。

コンソーシアムの目標としては十分満足できる成功といえるが、コンソで準備した主要機器のフル活用前提で、市場への投入にはここ 1～2 年を必要とする。コンソで開発した試作技術モデルをさらにブラッシュアップして、製品としての器量を整えなければならない。大学研究室で得られたデータはそれをバックアップし、成し遂げるのに十分な内容を備えている。コンソーシアムのおかげで、実用化、事業化は大きな一歩を踏み出した。現存する電気式センサをすべて光式センサに置き換えたい。水位計、成分計（屈折率計）の開発の成功は、歪み計、温度計、圧力計、接触センサ、感圧センサ、形状センサ、スマートマテリアル等への応用にと広がりを確信させることになった。大学の小さな研究室の学問的研究が生んだアイデアが、災害から人命の救助、日本の知的インフラストラクチャの保全に必ず役に立つかどうかは、コンソメンバーの今後の一層の連携にかかっている。

最後に、コンソーシアムに採択し資金を提供してくださり、実用化へのチャンスをくださった関東経済産業局の関係各位､同産業企画部技術企画課　伊沢直紀氏､選考委員各位、最終審査委員各位に対して、衷心より感謝いたします。アドバイザーとして種々の御示唆と激励を賜りました、東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻　保立和夫教授、防衛大学校応用物理学科　高橋信明教授、（独）港湾空港技術研究所材料研究室　濱田秀則室長、（株）横河総合研究所　大手明主席研究理事に対して心から感謝いたします。また、コンソーシアム形成に尽力してくださったタマティーエルオー株式会社の井深丹社長、同産学官連携事業部　石川宏俊氏、その他関係各位に心より感謝申し上げます。至らない総括研究代表者であった私を支えてくださった、副総括研究代表者である横河電子機器株式会社の山本眞人常務取締役技術開発本部長に感謝いたします。開発に携わった横河電子機器株式会社上野光司氏、浅宮政則氏、株式会社インターアクション桑原義男専務取締役、杉森忠之取締役開発本部長、同開発本部　高橋功氏の皆様に深く感謝致します。さらに、創価大学大学院工学研究科情報システム学専攻、博士前期課程２年の伊賀光博学生、中澤毅学

生、博士後期課程 1 年佐々木博幸学生には、実験室で献身的に、積極的に開発のための研究に従事してくださり、大きな貢献をしてくださいましたことに感謝致します。